Ginestra AMALDI
Laura FERMI
ALCHIMIA
DEL TEMPO NOSTRO
ULRICO HOEPLI EDITORE MILANO

Ginestra AMALDI e Laura FERMI

ALCHIMIA
DEL TEMPO NOSTRO

L'IPOTESI ATOMICA – LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ – L'ATOMO – LE TRASFORMAZIONI RADIOATTIVE – LE SOSTANZE RADIOATTIVE IN NATURA – COME SI RIVELANO LE RADIAZIONI RADIOATTIVE – IL NUCLEO – LE TRASFORMAZIONI DEI NUCLEI – LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE

22 incisioni nel testo e 18 tavole fuori testo

EDITORE · ULRICO HOEPLI · MILANO

1936 - XIV

INDICE-SOMMARIO

PREFAZIONE

Accompagnare il lettore profano in una peregrinazione attraverso ai misteri dell'atomo e del nucleo atomico, non è cosa facile; il mondo in cui vengono fatte queste esplorazioni è tanto piccolo che la mente umana è difficilmente portata a concepirlo. Un primo problema dunque che si presenta all'autore di libri di divulgazione di tale materia, è di giungere a fare comprendere al lettore quali sono le grandezze con cui avrà a che fare. Quando poi si incominciano ad esporre fenomeni ed esperienze, bisogna tener conto che il lettore non si contenta di conoscere i risultati e la loro interpretazione, ma vuole che gli si dica come i fisici sono giunti ad essi, quali strumenti sono serviti a separare, individuare, misurare i minuscoli frammenti di cui la materia è costituita, e come si sono potute ricostruire le leggi che ne regolano le manifestazioni. Un lettore profano infine non è in grado, in genere, di seguire dei ragionamenti astratti, e ancora meno di comprenderne gli sviluppi in formule; eppure la fisica moderna non è tutta sperimentale e per-

tanto non è lecito trascurare il lavoro, quasi puramente matematico, dei teorici.

In questo libro tali difficoltà sono state superate per quanto lo permette la materia: quelle poche cifre, necessarie a dar l'ordine di grandezza delle particelle usate, sono accompagnate da esempi materiali che rendono tangibile il loro significato; un capitolo intero è dedicato ai vari apparecchi, molto semplici come concezione, con i quali si è potuto indagare la natura dei costituenti atomici e nucleari. I fisici vengono seguiti passo passo nella conquista delle cognizioni attuali sulla costituzione della materia, e tutto il libro potrebbe chiamarsi: « la storia della scoperta della struttura del nucleo ».

Infatti i fenomeni che hanno richiamato l'attenzione degli studiosi sulla struttura della materia sono stati i fenomeni radioattivi, nei quali alcuni elementi si trasformano spontaneamente in altri; e in questo libro, dopo una specie di introduzione sulla ipotesi atomica, vien descritto come siano stati scoperti i fenomeni radioattivi, come poco a poco essi siano stati interpretati, e come dalla loro interpretazione si siano accumulate molte cognizioni che hanno permesso di ricostruire la struttura dell'atomo prima e quella del nucleo poi.

Accanto alla radioattività naturale è stato scoperto da poco un nuovo fenomeno, la radioattività artificiale, che permette di riprodurre in laboratorio, secondo la volontà degli sperimentatori, le disintegrazioni che avvenivano solo spontaneamente in al-

cune poche sostanze. E anche la radioattività artificiale viene qui descritta, poichè essa è il più potente mezzo che si abbia oggi a disposizione per indagare l'interno del nucleo e determinare come siano composti i nuclei dei vari elementi.

Le teorie e ipotesi dei teorici, disseminate in mezzo ai fatti sperimentali, sono rese concrete con analogie ed esempi presi nel mondo macroscopico; esse quindi, anche se poco esatti, sono più facilmente comprensibili. Così la teoria dei quanti, di cui molti hanno sentito parlare, senza in genere sapere in cosa consista, è qui esposta in forma facile, mescolata a paragoni ed esempi, che permettono al lettore di comprendere l'interpretazione quantistica della emissione di energia e le relazioni fra quanti e corpuscoli.

Già da qualche tempo è diffuso, anche tra i profani, l'interesse per la fisica atomica e nucleare; ma se, per questa ragione, sono già stati scritti, sia in Italia che all'estero, articoli, opuscoli e libri divulgativi di fisica atomica, ben poco è stato scritto finora sulla costituzione del nucleo; anche perchè, essendo questo argomento di ricerca molto recente, la letteratura ne è ancora molto frammentaria: questo libro è stato scritto allo scopo di colmare, per quanto è possibile, tale lacuna.

La materia in esso particolarmente trattata riguarda la trasformazione spontanea o artificiale dei nuclei degli elementi. Alle indagini compiute dai fisici in questo campo hanno prevalentemente con-

tribuito due donne, anzi due spose: MARIA CURIE, *che col marito* PIETRO *pose le basi della radioattività naturale, e la loro figliuola,* IRENE, *che col marito* JOLIOT, *produsse per prima il fenomeno della radioattività artificiale. Questa scoperta fu tosto seguita dalle ormai celebri indagini di* ENRICO FERMI *sulla radioattività artificiale per bombardamento con neutroni, indagini nelle quali il* FERMI *fu molto attivamente assistito, fra gli altri, dal suo valoroso collaboratore prof.* AMALDI. *Il lettore avrà già compreso che le autrici di questo libro sono appunto le gentili spose di* ENRICO FERMI *e di* EDOARDO AMALDI.

O. M. CORBINO

Capitolo I

L'IPOTESI ATOMICA

Negli ultimi cinquanta anni le idee sulla costituzione della materia si sono rapidamente evolute, poichè i fisici, lasciando da parte il campo dei fenomeni macroscopici, si sono rivolti ai fenomeni che avvengono nel minuscolo mondo atomico. Il loro studio non è stato facile nè leggero: anzi, le difficoltà incontrate dagli scienziati sono state superate con molta fatica e con l'aiuto di complicate teorie matematiche; per questa ragione i profani non hanno potuto seguire i fisici passo passo nella loro investigazione ed hanno spesso finito col considerare tutto questo lavoro come troppo scientifico e arido per poter essere guardato con interesse. Solo ultimamente alcuni risultati sperimentali pubblicati dai giornali hanno richiamato l'attenzione del pubblico ed hanno destato in qualcuno la curiosità di sapere di più, di collegare i pochi fatti che la stampa quotidiana ha potuto divulgare, e farsi un'idea chiara, se pure schematica, dell'andamento dei lavori scientifici. E poichè i risultati sono spesso sem-

plici e interessanti, anche se i metodi di studio sono alquanto difficili, abbiamo pensato di esporre in questo libro alcune delle idee attuali sulla costituzione della materia e delle prove sperimentali su cui queste sono basate.

La concezione oggi universalmente accettata sulla costituzione della materia è la concezione atomica, la quale per il grandissimo patrimonio di teorie provate dall'esperienza, almeno nella massima parte, e per la forma assolutamente logica e coerente che ha conquistata, viene ormai considerata non più un'ipotesi ma una realtà.

È noto a tutti, crediamo, quali siano i primi accenni a una concezione discontinua o atomica della materia: anche chi non si è mai interessato di scienze fisiche è stato costretto a scuola a tradurre il *De rerum natura* di LUCREZIO, il quale ha esposto in veste poetica i concetti della scuola Abderita sulla costituzione del mondo.

Nel V secolo avanti Cristo il filosofo greco LEUCIPPO, e più di lui il suo discepolo DEMOCRITO DI ABDERA, confutando le idee di ZENONE D'ELEA, vennero costruendo una teoria discontinua della materia. Gli Abderiti ammisero che ogni corpo fosse formato da numerosissime particelle solide, gli atomi, che sono indivisibili. Essi, che per DEMOCRITO costituiscono il *pieno*, cioè l'*essere*, si mescolano col vuoto, cioè col *non essere*, e formano così la materia. Finchè contengono vuoto i corpi sono divisibili, ma questa divisibilità cessa quando

si arriva agli atomi che non contenendo vuoto sono *duri e solidi* e per di più animati da un movimento vorticoso, *ingenerato ed eterno*, che continua anche quando essi non sono immersi nel vuoto.

Come si vede, le idee di DEMOCRITO, per quanto molto ardite rispetto ai suoi tempi, sono costruite su concetti filosofici, e non su principi scientifici; e forse non ha torto Sir JAMES JEANS, astronomo inglese vivente di grande valore, il quale così si esprime:

« Dato il gran numero di pensatori che hanno meditato sulla struttura della materia, non fa meraviglia, secondo le leggi della probabilità, che alcuni di essi siano arrivati assai vicini al vero. Un'opinione che finisce per essere press'a poco sicura, non ha tuttavia maggior valore per il progresso della scienza, di un'opinione erronea, finchè la ragione scientifica non ha autorizzato a ritenere la prima più esatta della seconda ».

Lasciando dunque da parte queste idee dei filosofi greci, che hanno poca importanza nella storia della teoria atomica, cerchiamone invece le prime basi scientifiche. Bisogna per questo lasciar passare non solo il periodo dell'antichità greco-latina, ma anche tutto il Medio Evo, periodo che fu offuscato da troppo dogmatismo filosofico e religioso, per poter portare un contributo importante al pensiero scientifico. Solo dunque nell'Evo moderno, e precisamente verso la fine

del XVIII secolo, si cominciarono a sviluppare le idee che attraverso ad una catena logica di fatti portano alle concezioni moderne.

In questa epoca i chimici si erano liberati dai preconcetti dell'alchimia e andavano stabilendo le prime leggi qualitative sulla combustione e sulle altre reazioni chimiche. Passando poi allo studio quantitativo dei fenomeni, essi si diedero a misurare le quantità dei corpi che sono capaci di reagire tra loro e in questo modo PROUST e DALTON arrivarono a stabilire le leggi delle proporzioni multiple e definite. Queste leggi furono trovate per via puramente sperimentale e soltanto in seguito il DALTON stesso ne diede una spiegazione, oggi da tutti riconosciuta, in base alla sua ipotesi atomica. Il DALTON era un maestro elementare che l'amore per le questioni naturali portò a studiare fenomeni chimici e fisici; fra l'altro studiò su se stesso quel difetto della vista che da lui prese il nome di daltonismo; ma questa, potremmo dire, è un'altra storia e a noi non interessa. Ciò che invece ha molta importanza per i nostri scopi è il fatto che nel 1803, davanti al *Literary and Phylosophical Society* di Manchester, egli espose per primo in forma logica ed esatta l'ipotesi atomica.

In essa egli ammise che ciascun elemento fosse costituito da un grandissimo numero di particelle tutte eguali tra loro, le quali prendono il nome di atomi; essi possono subire tutte le azioni

fisiche e chimiche a cui sappiamo sottoporli, senza che le loro proprietà vengano modificate. Aggruppando numeri ben determinati di atomi si formano le varie molecole; quelle degli elementi semplici sono costituite da un atomo o più atomi eguali, mentre quelle dei composti chimici risultano dall'unione di un certo numero di atomi di specie diversa.

I fatti su cui si basava Dalton nel costruire l'ipotesi atomica, mancavano di ogni elemento che potesse servire a stabilire le dimensioni degli atomi e delle molecole; l'unica cosa che egli poteva dire in proposito era che le molecole debbono essere abbastanza piccole per sfuggire alla osservazione individuale, non solo a occhio nudo, ma anche coi più potenti mezzi di ingrandimento. La chimica ci fornisce dunque un limite superiore per le dimensioni delle molecole; ma spetta al lavoro dei fisici l'aver stabilito quanto più piccole del limite precedente esse siano in realtà.

Infatti, mentre da un lato i chimici giungevano all'ipotesi atomica attraverso alla spiegazione delle leggi sui composti chimici, i fisici d'altra parte erano portati alle stesse conclusioni dall'interpretazione di quell'insieme di fatti che costituiscono la teoria cinetica della materia. La comprensione di questa teoria implicherebbe la conoscenza approfondita delle leggi dei gas e dei principali concetti della termodinamica. Non sarebbe quindi il caso di spiegarla qui per

esteso, ma sarà tuttavia opportuno il tracciarne almeno le linee essenziali.

Abbiamo ammesso finora che la materia abbia una struttura corpuscolare finissima, ma non ci siamo ancora domandati per quali ragioni gli atomi e le molecole restino uniti fra loro e i vari corpi non si disgreghino spontaneamente, come si disgrega disseccandosi un castello costruito con la sabbia. La risposta sta nel fatto che gli atomi e le molecole esercitano sugli atomi e sulle molecole circostanti delle forze di interazione dovute a varie cause. Fra queste le più importanti per il nostro scopo sono le forze di coesione: esse sono tanto maggiori quanto più le molecole sono ravvicinate, almeno fino a un certo limite di vicinanza. D'altra parte la teoria cinetica, come spiega la parola stessa (da *κίνησις* movimento), è basata sul fatto che tutte le particelle costituenti la materia non stanno ferme, ma si muovono continuamente con velocità che dipende dalla loro energia. Si comprende quindi che se le forze di coesione sono forti rispetto all'energia molecolare, esse impediscono alle molecole di allontanarsi dalla posizione iniziale e ogni molecola potrà solamente vibrare intorno a una posizione di equilibrio; questo caso corrisponde allo stato solido della materia. Se invece le forze di coesione sono piccole rispetto all'energia molecolare, le varie molecole potranno allontanarsi anche di molto dalla posizione iniziale e si muoveranno

liberamente attraverso ai corpi a cui appartengono; questo caso corrisponde allo stato liquido ed aeriforme della materia.

In base a questi concetti, il cambiamento di stato di un corpo va interpretato come una variazione nei rapporti fra l'energia molecolare e le forze di coesione; per fare un esempio su di un corpo che si possa trovare nei tre stati, solido, liquido ed aeriforme, considereremo il caso dell'acqua. Supponiamo dunque di riscaldare un pezzo di ghiaccio (acqua allo stato solido); esso fonderà formando dell'acqua liquida; se continuiamo a scaldare, dopo un po' l'acqua comincerà a bollire e il vapore abbandonerà il recipiente nel quale avevamo posto il ghiaccio. Ciò vuol dire che sotto gli 0 gradi le forze di coesione dell'acqua sopraffanno l'energia molecolare e le molecole restano legate attorno alla posizione d'equilibrio (stato solido); aumentando la temperatura, e precisamente tra 0 e 100 gradi, le molecole vanno acquistando una energia sempre maggiore, sufficiente a vincere le forze di coesione e si muovono con velocità crescente attraverso la massa liquida, che esse non possono però abbandonare (stato liquido). Oltre i 100 gradi finalmente, le molecole, per la grande energia acquistata, si liberano del tutto dai legami coesivi e possono muoversi liberamente a grande velocità, in qualsiasi direzione, completamente indipendenti le une dalle altre (stato aeriforme).

Si conclude da quanto abbiamo osservato, che

l'energia e la conseguente velocità delle molecole è tanto maggiore quanto più elevata è la temperatura. Per questa ragione i moti molecolari prendono il nome di moti di agitazione termica.

***

Volendo costruire un modello di gas e farci un'idea dei moti molecolari, possiamo prendere un recipiente qualsiasi, possibilmente di vetro, per vedere cosa accade al suo interno, mettervi dentro una manciata di minute palline (pallini da caccia, o più semplicemente granelli di miglio, fagioli ecc.) e scuotere violentemente il tutto. Le palline verrebbero così a rappresentare le molecole; vi è però la notevole differenza che il moto delle molecole è continuo, quasi, come dice DEMOCRITO, eterno; le nostre palline invece ben presto si arrestano e cadono sul fondo del recipiente; ma se continuiamo a scuotere quest'ultimo abbastanza a lungo, avremo il tempo di osservare comodamente i moti disordinati delle palline. Queste, che in un recipiente sufficientemente grande e vuoto, si muoverebbero in linea retta, vengono invece continuamente deviate dai numerosi urti contro le altre palline e contro le pareti del recipiente. Soffermiamoci un momento su questo secondo tipo di urti: le molecole dei gas, analogamente alle palline, vanno continuamente a sbattere contro

le pareti del recipiente in cui sono contenute; nel caso delle palline ogni urto, che consiste in uno spintone dato alla parete, sarà segnalato da un lieve rumore; anche le molecole danno delle spinte alle pareti, ma i loro urti sono molto più lievi e non si possono individuare; per di più le molecole sono così numerose che gli urti vengono a essere tanto fitti da potersi considerare continui. Come ci si può allora accertare dell'esistenza di questi urti? Dall'effetto che essi producono, il quale consiste nella pressione sulle pareti del recipiente che è tanto maggiore quanto più gli urti sono numerosi.

Tutti sanno che la pressione di un gas può variare al variare della sua concentrazione e temperatura; per renderci ragione di questo fatto, faremo variare nel nostro modello di gas il numero delle palline e scuoteremo il recipiente con diversa violenza in modo da imprimere loro diverse velocità; verificheremo allora che il numero di urti aumenta con l'aumentare del numero e della velocità delle palline. Sostituendo alla parola palline la parola molecole si conclude che in un gas la pressione aumenta con l'aumentare del numero e della velocità delle molecole, cioè della concentrazione del gas e della sua temperatura.

Passando ora a osservare gli urti delle varie molecole tra loro, potremo verificare col solito modello di gas, che anche questi urti aumentano coll'aumentare del numero delle molecole e della loro

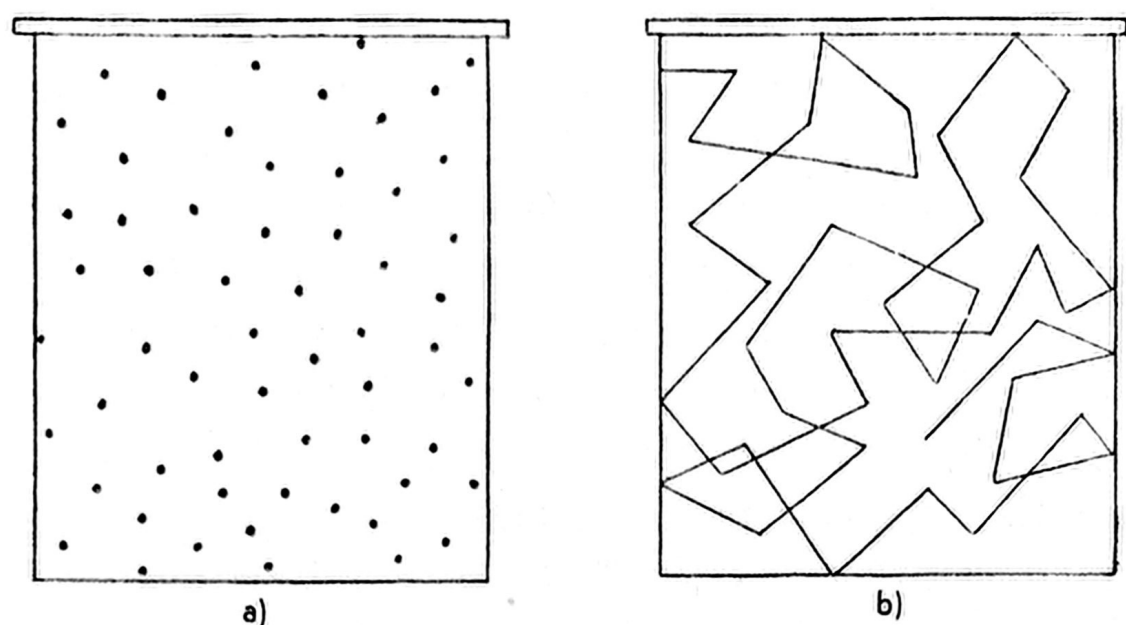



Fig. 1. — *a*) distribuzione delle molecole di un gas; *b*) percorso di una molecola in un gas.

velocità, cioè con l'aumentare della concentrazione e della temperatura del gas. A parità di queste due condizioni il numero di urti fra le varie molecole, che costituisce l'attrito interno del gas, dipende dalla loro grandezza, poichè, evidentemente, gli urti sono più frequenti quando le molecole sono più grandi; e quindi dalla misura dell'attrito interno di un gas si può risalire alle dimensioni molecolari.

Potrebbe pensarsi che per studiare quantitativamente le proprietà di un gas occorresse seguire il comportamento delle singole molecole, una per una. Il problema posto in questa forma sarebbe insolubile; ogni molecola è infatti sottoposta ad urti più o meno violenti che deviano il suo percorso più o meno bruscamente ma sempre in maniera disordinata e irregolare; le tra-

iettorie delle singole particelle perciò acquistano un aspetto intricatissimo. Ciò nonostante le leggi alle quali obbediscono i gas sono semplici e sono state determinate con relativa facilità. Questi due fatti, a prima vista antagonistici, si conciliano tenendo conto dell'enorme numero di corpuscoli costituenti un gas. La statistica ci insegna infatti che formando la media su un numero grandissimo di individui vengono ad attenuarsi le irregolarità; e tanto maggiormente quanto più grande è il numero degli individui. Questo fatto è generale e non soltanto la statistica di un insieme di molecole disordinate porta a leggi semplici e ben stabilite, ma così anche fra l'altro la statistica di una popolazione. Se consideriamo uno speciale carattere somatico, per esempio la statura, in generazioni successive di padre in figlio, troveremo numerose irregolarità di carattere assolutamente capriccioso. Considerando invece la variazione nella statura di tutto un popolo nei diversi tempi, verranno a sparire le fluttuazioni individuali, per essere sostituite da una legge di variazione regolare e continua, determinata da elementi controllabili, quali le variazioni di ambiente, di condizioni economiche, di vitto, ecc.

Abbiamo visto che la conoscenza della teoria cinetica non solo porta ad ammettere una strut-

tura atomica della materia, ma che, nel caso particolare dei gas, essa ci fornisce un modo di valutare le grandezze molecolari, partendo dall'attrito interno. Naturalmente non sarebbe il caso di riferire in questo libro i calcoli che sono stati fatti, ma ci limiteremo a esporre alcune delle dimensioni molecolari. Premettiamo però che i dati più sotto esposti non sono stati ottenuti con un solo metodo, ma che, basandosi su diversi fenomeni e calcolando per diverse vie le stesse grandezze, i fisici hanno ottenuto risultati uguali, almeno entro i limiti dell'errore sperimentale; cosicchè si può ritenere che le dimensioni date siano assai prossime alla realtà.

È difficile in genere farsi un'idea materiale del significato dei numeri. Finchè si tratta di decine, di centinaia e di migliaia, sopratutto se esse sono decine, centinaia o migliaia di lire, nessuno stenta a rendersi conto della loro grandezza; e nel caso particolare delle lire, tutti ammettono senza sforzi mentali che per esempio con una lira non si può comprare una casa e che mille lire sono troppe per un biglietto del cinematografo; ma i nostri lettori salterebbero a piè pari la pagina in cui si riportasse una sfilza di dati rappresentati da un numero con troppi zeri sia in testa che in coda. Cercheremo invece di rendere in qualche modo facilmente concepibile, almeno come ordine di grandezza, ogni numero che useremo.

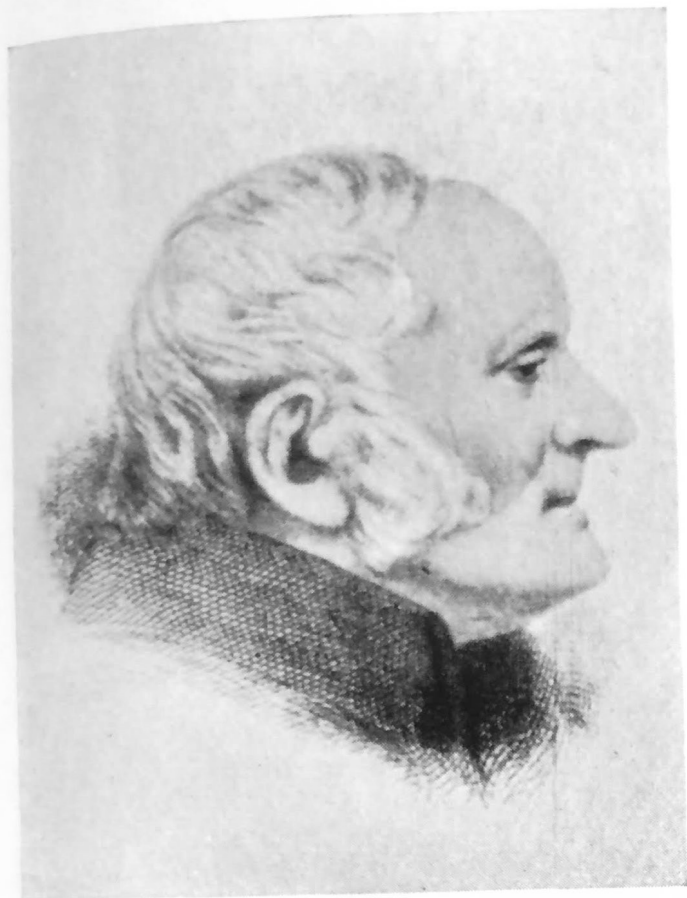
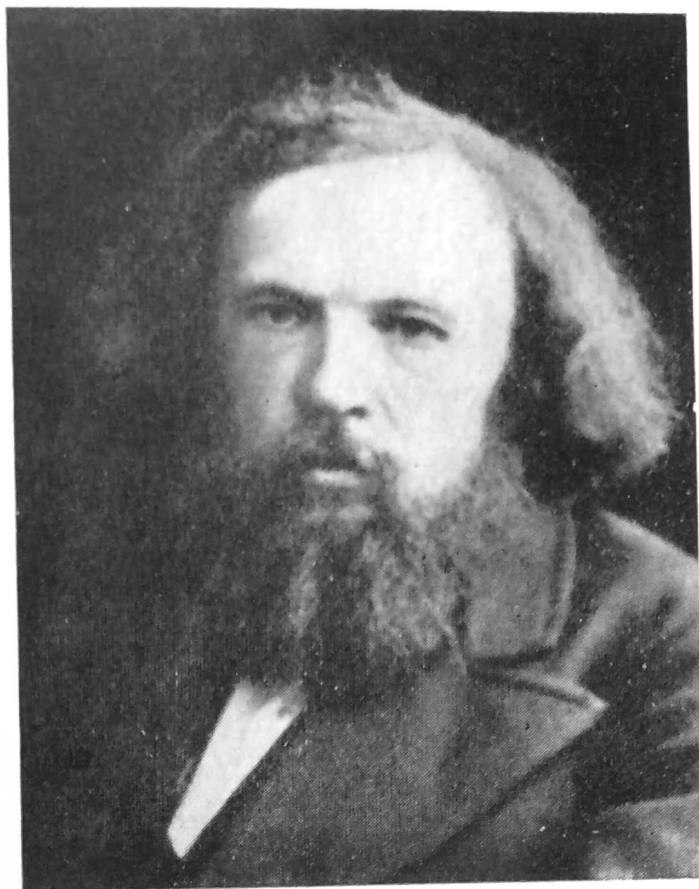
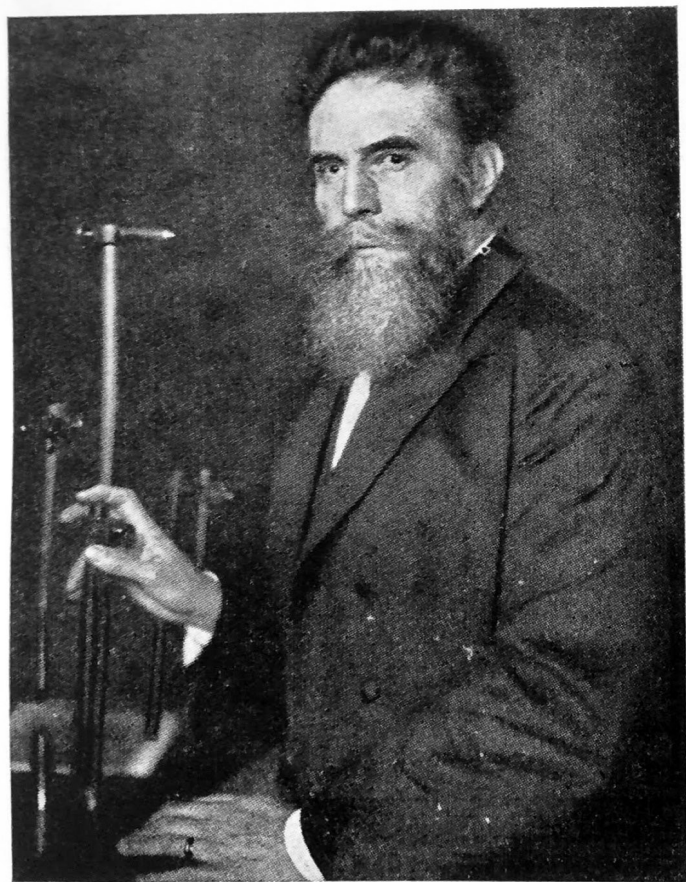
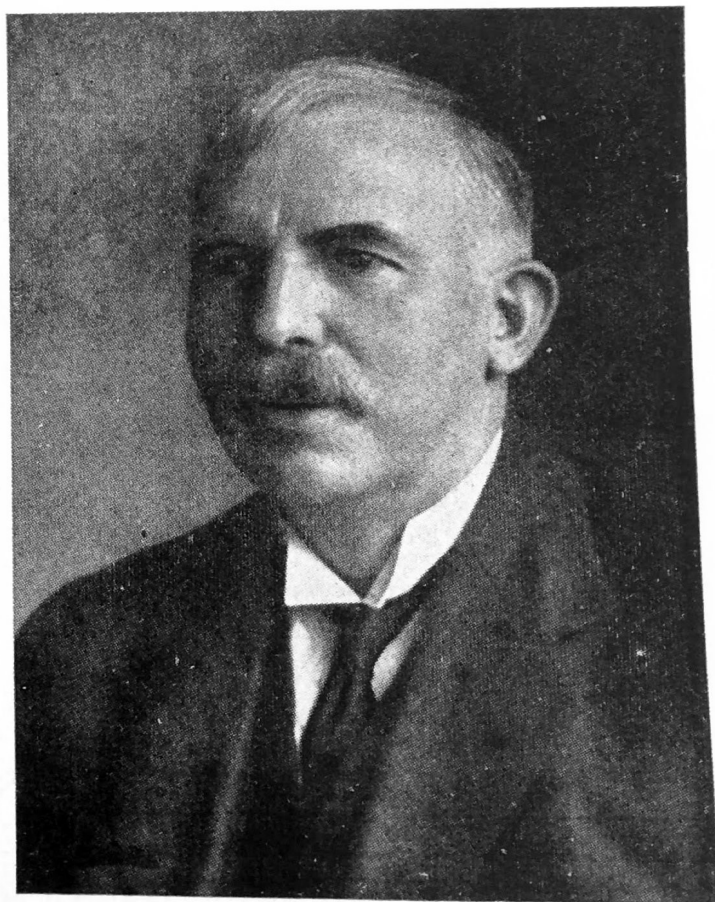
L'ordine di grandezza del raggio atomico è di 10^{-8} centimetri; questo numero si potrebbe anche scrivere 0,00000001, ma questa diversa notazione non ci aiuterebbe a comprendere la piccolezza del numero. Per farcene una idea supponiamo che sia possibile prendere gli atomi individualmente e metterli in fila, gli uni accanto agli altri. In un centimetro entrerebbero allora 50 milioni di atomi, e se ognuno di essi diventasse grosso solo come un pisello, con 50 milioni di atomi si farebbe una collana lunga quanto da Roma a Firenze. È inutile riferire i dati analoghi per le dimensioni molecolari, poichè a queste si risale facilmente sapendo quanti atomi sono contenuti nelle molecole; quelle dei composti chimici inorganici sono generalmente costituite di pochi atomi: di un solo atomo quelle dei gas nobili, di due atomi quelle dell'ossigeno, dell'azoto, dell'acido cloridrico, ecc; di tre quelle dell'acqua, di quattro quelle dell'ammoniaca, ecc.; le molecole dei composti organici possono anche essere costituite da qualche decina di atomi. Possiamo però renderci conto della piccolezza delle molecole, pensando al numero stragrande di esse che entra in un volume anche piccolissimo: per esempio, si è calcolato che in una goccia d'acqua sono contenute 10^{21} molecole; ora una goccia è un volume assai piccolo, poichè vi sono circa ventimila gocce in un litro; eppure se le 10^{21} molecole contenute nella gocciolina d'acqua assumessero ognuna le dimensioni

della goccia, si avrebbe tanta acqua da riempire tutto l'Adriatico. E viceversa, se tutte le gocce di cui si può pensare costituita la parte acquea del nostro globo si riducessero ognuna alle dimensioni di una molecola, l'intero mare entrerebbe in una bottiglia da un litro.

Le minutissime particelle che costituiscono i corpi, come abbiamo visto, sono in continuo movimento, e la loro velocità media dipende dalla loro massa e dalla temperatura, essendo più rapide le molecole di massa minore e appartenenti a corpi più caldi. In condizioni normali di temperatura una molecola di ossigeno ha la velocità di circa 400 metri al secondo: se cioè non venisse deviata da altre molecole incontrate sul suo cammino, essa andrebbe in mezz'ora da Roma a Milano. Ma questa ipotesi non si avvera, poichè ogni molecola incontra continuamente le altre sorelle e urta contro di esse cambiando ogni volta direzione. Ha preso il nome di « cammino libero medio » la media dei percorsi che una molecola può fare senza ricevere urti; esso dipende naturalmente dalla distanza tra le molecole e quindi, in un gas, dalla sua rarefazione. Se il gas si trova alla pressione atmosferica, il cammino libero medio delle sue molecole è di circa un centomillesimo di centimetro; dunque una molecola sbatacchia centomila volte prima di riuscire a percorrere un centimetro; e data la sua velocità, essa riceve in un secondo circa tre miliardi di urti. Per

renderci conto della grandezza di un miliardo possiamo calcolare il tempo necessario per contare fino a un miliardo: ebbene, se un uomo non si interrompesse nè di giorno nè di notte, gli occorrerebbero 32 anni per contare da uno a un miliardo.

***

Fin verso la metà del secolo scorso si ritenne l'atomo il più piccolo costituente della materia, e cioè si ammise che esso fosse, secondo il significato etimologico della parola (dal greco ἄτομος) indivisibile. Nel 1897 però THOMSON e WIECHERT riuscirono a isolare dei corpuscoli che avevano proprietà diverse da quelle degli atomi. Fu riconosciuto per prima cosa che essi sono carichi di elettricità negativa, mentre gli atomi si presentano come elettricamente neutri. Il peso di uno di questi corpuscoli è circa 1800 volte inferiore a quello dell'atomo più leggero, e la loro velocità può essere anche quasi uguale a quella della luce (300.000 chilometri al secondo). A questi corpuscoli, che vengono emessi dagli atomi in varie circostanze, è stato dato il nome di «elettroni»; e tutti gli elettroni, qualunque sia la loro provenienza, e qualunque siano le condizioni nelle quali vengono emessi, sono tra loro perfettamente uguali, sia per massa, che per carica elettrica.

JOHN DALTON

DIMITRI MENDELEJEFF

WILHELM KONRAD RÖNTGEN

RUTHERFORD

Capitolo II

LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ

L'idea di trasformare i metalli l'uno nell'altro è vecchia quasi quanto l'uomo e la storia dei tentativi più o meno seri di fabbricare l'oro, quel metallo tanto pregiato e bramato da tutti gli uomini, potrebbe seguirsi risalendo i secoli, fino all'epoca di Cristo. Sono infatti del I secolo dopo Cristo i primi tentativi alchimistici di cui sia stato tramandato un ricordo scritto, per quanto, a dire di antichi trattati di alchimia, questa scienza sarebbe sorta e sarebbe stata in uso già da molto e molto tempo.

Fra i più antichi personaggi storici o pseudostorici che praticarono le scienze occulte nell'intento di fabbricare l'oro, vi è una certa Maria Ebrea, che dovette vivere fra il primo e il secondo secolo dopo Cristo; più tardi la tradizione popolare confuse questa Maria Ebrea con Maria la sorella di Mosè, e questa, e altre confusioni del genere, fecero sorgere la credenza che l'alchimia fosse conosciuta già ai tempi biblici.

A Maria Ebrea si attribuisce, forse non a ra-

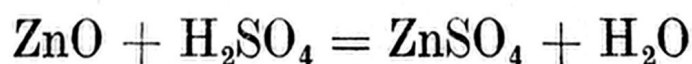
gione, l'invenzione del « bagno Maria », quella maniera di far scaldare dei recipienti senza porli direttamente sulla fiamma, ma immergendoli in un bagno d'acqua bollente.

È più interessante per noi una novella che ci proviene dalla stessa « scienziata », di quei tempi lontani. Essa racconta che una madre generò sette figli, sette metalli, dei quali due, l'argento e l'oro, erano molto pregiati e gli altri erano assai più vili. Uno di questi ultimi andò a lamentarsi dalla madre perchè non gli aveva trasmesse le proprietà dei fratelli più pregiati. Allora la madre gli disse che se esso si fosse sciolto nelle minutissime particelle che lo costituivano e fosse tornato in seno a lei avrebbe potuto diventare oro. Vediamo dunque in questa novella l'idea di far l'oro per sintesi dagli altri metalli, e probabilmente « il seno della madre » in cui doveva compiersi la trasformazione, era la stufa o il crogiolo in cui gli alchimisti facevano le loro esperienze.

Ben presto si cominciò a descrivere una pietra filosofale e una polvere di proiezione che avevano entrambe la mirabolante proprietà di trasformare un metallo nell'altro. E alla ricerca della pietra filosofale si misero con impegno studiosi seri, pseudoscienziati e illusi di tutti i generi. Quantunque nel materiale caotico proveniente da ricerche di questo tipo si trovino anche scoperte serie, che costituirono in seguito le basi della chimica, non può far meraviglia che

gli alchimisti si trovassero di fronte molti nemici e molti increduli. Dante, per esempio, mette due alchimisti proprio nell'ultima bolgia dell'Inferno; la Repubblica di Venezia proibì ogni pratica di alchimia e a Leone X si attribuisce un divertente aneddoto che mostra come egli sapesse prendere in giro con garbo certi ricercatori poco seri. Si racconta infatti che un certo Augurelli andasse da Leone X a riferirgli di aver costruita una pietra filosofale di sua invenzione, la quale dava possibilità insperate di fabbricare l'oro. L'alchimista sperava di ottenere con ciò un vistoso premio dal papa; ma questi dopo averlo attentamente ascoltato gli regalò una borsa perchè vi mettesse dentro tutto l'oro che avrebbe fabbricato.

Quando, più tardi l'alchimia prese un indirizzo più scientifico e da essa si andò formando la scienza chimica, il sogno di fabbricare l'oro rimase e ancora nel 1912 una società alchimistica francese pubblicava lavori in proposito. Ma gli studiosi più seri abbandonarono l'idea come impossibile. Si vedeva infatti in tutte le manipolazioni chimiche, che si poteva trasformare una sostanza composta di elementi diversi in un'altra, ma che gli elementi componenti rimanevano sempre inalterati. Così, trattando ad esempio l'ossido di zinco (ZnO) con acido solforico (H_2SO_4), si ottiene acqua (H_2O) e solfato di zinco ($ZnSO_4$), secondo la reazione:

$$ZnO + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2O$$

In altre parole, le reazioni chimiche arrivano a modificare la composizione delle molecole, ma lasciano sempre gli atomi inalterati.

Doveva quindi meravigliare moltissimo la scoperta della *radioattività*, fenomeno che consiste nella trasformazione spontanea di un elemento in un altro con emissione di radiazioni. Questa scoperta fu puramente casuale e nei primi tempi non fu possibile interpretare completamente i fatti che erano stati osservati. Tuttavia la sua importanza fu universalmente riconosciuta e allo scopritore della radioattività, il fisico francese HENRI BECQUEREL, fu assegnato ben presto il premio Nobel.

Potrà forse interessare il conoscere le circostanze nelle quali fu fatta la scoperta e noi le esporremo brevemente. Verso la fine di febbraio del 1896 il BECQUEREL faceva delle esperienze sulla *fosforescenza* di diverse sostanze. Le sostanze fosforescenti hanno la proprietà di diventare luminose dopo essere state eccitate, per esempio con l'esposizione alla luce. Già vari fisici avevano studiato questo fenomeno e ora si trattava di accertare se la fosforescenza era accompagnata dall'emissione di raggi X o se consisteva solo nell'emissione di luce.

Il BECQUEREL aveva scelto per le sue esperienze dei sali di uranio, i quali sono fortemente fosforescenti, e procedeva alla seguente maniera: esponeva alla luce del sole i sali in esame,

poi li avvolgeva in carta nera e posava il pacchetto così fatto sopra una lastra fotografica. Le radiazioni luminose emesse dai sali di uranio diventati fosforescenti per essere stati eccitati dalla luce, venivano dunque completamente schermate dalla carta nera. Il BECQUEREL trovò tuttavia sulle lastre fotografiche l'immagine ben netta del pacchetto contenente i sali di uranio; questi avevano evidentemente emesso una radiazione più penetrante di quelle luminose, la quale aveva potuto attraversare la carta nera e impressionare la lastra fotografica. Il fisico concluse che la fosforescenza dei sali di uranio è accompagnata dall'emissione dei raggi X, e fece subito una comunicazione in proposito all'*Académie des Sciences*.

Non possiamo dire per quanto tempo sarebbero ancora rimasti sconosciuti i fenomeni radioattivi, se nel marzo del 1896 fosse durato il bel tempo. La fortuna però volle che il sole si coprisse di nuvole e che quando HENRI BECQUEREL, che desiderava ripetere le sue esperienze, aveva preparato i suoi pacchettini di sali di uranio, il sole sparisse completamente. Lo scienziato ripose in un cassetto le lastre fotografiche e sopra a ognuna di esse posò uno dei pacchettini; poi si mise ad attendere pazientemente il ritorno del bel tempo. Ma poichè questo tardava, egli pensò di sviluppare le lastre fotografiche: su di esse avrebbe trovato una debole ombra, dovuta

a qualche raggio X emesso dai sali di uranio che conservavano un po' di fosforescenza per molto tempo. Ma contrariamente a quanto egli si aspettava, le lastre fotografiche portavano tutte l'immagine del pacchetto ben nitida, proprio come nel caso in cui la sostanza si era potuta esporre al sole. Dunque le radiazioni dei sali di uranio non erano dovute alla sua fosforescenza e venivano emesse spontaneamente, senza bisogno di una causa eccitatrice.

Il Becquerel proseguì le sue esperienze con vari composti dell'uranio e li trovò tutti capaci di emettere radiazioni. Anticipando di qualche tempo l'uso della parola « radioattivo » possiamo concludere che i sali di uranio esaminati da Becquerel erano tutti radioattivi.

Ed ora, prima di proseguire nell'esporre la storia delle scoperte sulla radioattività, dobbiamo aprire una breve parentesi che ci aiuterà a comprendere il procedimento usato per determinare se e quanto un elemento è radioattivo; vogliamo cioè spiegare un fenomeno elettrico prodotto nei gas dal passaggio di varie radiazioni. Questo fenomeno, che prende il nome di ionizzazione, resterà più evidente quando si sarà spiegata la costituzione dell'atomo; tuttavia esso era già noto prima che fossero stabiliti con precisione i rapporti fra le cariche positive e negative dell'atomo ed era interpretato qualitativamente se non quantitativamente.

Il fenomeno della ionizzazione consiste in questo: alcune radiazioni, attraversando un gas, sono capaci di strappare, per così dire, degli elettroni dagli atomi. È chiaro che se togliamo un elettrone, che è carico negativamente, da un atomo, che è elettricamente neutro, questo resterà carico positivamente. Nel gas troveremo dunque dei corpuscoli carichi in parte di elettricità negativa e in parte di elettricità positiva. Questi corpuscoli prendono il nome di «ioni». La ionizzazione del gas, cioè la quantità di elettricità portata dagli ioni, dipende evidentemente dal numero di atomi spezzati, e quindi dalla capacità che hanno le radiazioni di spezzare gli atomi. È intuitivo che se ionizziamo un gas con un determinato tipo di raggi, l'effetto prodotto, cioè la ionizzazione, sarà tanto più forte quanto maggiore è la quantità di raggi che immettiamo nel gas.

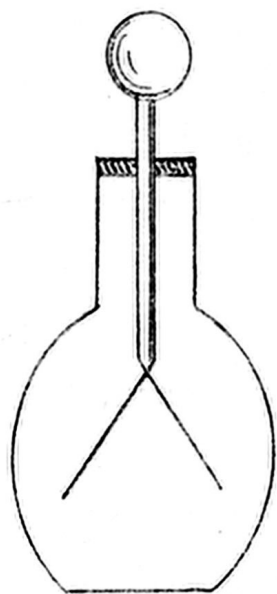



Fig. 2. — L'elettroscopio a foglie d'oro. Quando l'elettroscopio è carico, le foglioline divergono.

La ionizzazione di un gas può misurarsi per mezzo di un semplicissimo apparecchio, l'elettroscopio a foglie d'oro (fig. 2). Esso consiste in un'asticciola metallica fissata a un'estremità di un manico isolante e terminante all'altra estremità con due laminette d'oro, che si possono divaricare o tener ravvicinate. Se prendiamo

in mano l'elettroscopio rivolgendolo verso il basso, le due foglioline si avvicinano per effetto del loro stesso peso, come le pagine di un libro si richiudono se lo prendiamo per la costola rivolgendo i fogli in basso. Se però, mantenendo l'elettroscopio in questa posizione, lo carichiamo, per esempio di elettricità positiva, le due foglioline che restano così cariche dello stesso segno, tendono a respingersi e se la carica è sufficiente, la repulsione ha il sopravvento sul peso: in definitiva vediamo le estremità inferiori delle due foglioline sollevarsi e allontanarsi, tanto più quanto maggiore è la carica. Quando l'elettroscopio carico è ben isolato, le sue foglioline restano divaricate. Se però lo si mette in un mezzo che conduce l'elettricità, esso si scarica, la repulsione tra le due laminette d'oro diminuisce ed il loro peso le fa ricadere l'una sull'altra. Ora un gas ionizzato è un ottimo conduttore dell'elettricità e un elettroscopio posto in esso si scarica tanto più rapidamente quanto maggiore è la ionizzazione.

Torniamo ora alle esperienze di Becquerel: egli si accorse che anche le radiazioni emesse dai composti dell'uranio sono capaci di ionizzare i gas e quindi di agire sopra un elettroscopio. Confrontando con questo metodo composti contenenti proporzioni diverse di uranio, egli trovò che la ionizzazione era tanto maggiore quanto maggiore era la percentuale di uranio contenuta nel sale e che naturalmente la massima ionizzazione era quella prodotta dall'uranio metallico.

Intanto, allo scopo di determinare se la radioattività fosse o meno un fenomeno generale della materia, Madame MARIE CURIE andava esaminando, col metodo dell'elettroscopio, molte sostanze. Infine ella dovette concludere che solamente l'uranio e il torio sono radioattivi, mentre gli altri elementi non sono capaci di emettere radiazioni. I fisici si dettero quindi a studiare i composti del torio e dell'uranio, e misurando il loro potere radioattivo, Madame CURIE e il marito, il fisico PIERRE CURIE, si accorsero nel 1898 che alcune pechblende (minerali di uranio) provenienti da Joachimstal nella Boemia avevano un potere radioattivo maggiore dell'uranio metallico. I coniugi CURIE pensarono allora che le pechblende di Boemia dovessero contenere un altro elemento radioattivo. Infatti con varie manipolazioni chimiche essi riuscirono a separare un elemento, fino ad allora sconosciuto, al quale dettero il nome di « polonio », dalla patria della signora CURIE. Pochi mesi dopo gli stessi coniugi CURIE riuscirono a separare un altro elemento che ha potere radioattivo qualche milione di volte maggiore di quello dell'uranio. A questo elemento è stato dato il nome di « radio ».

La scoperta degli altri principali elementi radioattivi seguì a poca distanza quella del radio e del polonio. A. DEBIERNE trovò « l'attinio », BOLTWOOD lo « ionio », HOFFMAN e STRAUSS il « radio *D* », ecc.

Trovate così le più importanti sostanze radio-

attive, era naturale che l'attenzione dei fisici si volgesse alle radiazioni dei corpi radioattivi, e anche questo studio doveva essere straordinariamente fecondo di risultati per la fisica atomica. Lord ERNESTO RUTHERFORD, una delle maggiori autorità nel campo della moderna fisica sperimentale, si accorse per primo che i raggi emessi dalle sostanze radioattive sono di tre tipi diversi. Egli giunse a questo risultato osservando il diverso assorbimento delle radiazioni da parte di diversi corpi. Non tutti i raggi infatti vengono egualmente assorbiti attraversando la materia; e lo spessore che una radiazione è capace di attraversare in una determinata sostanza senza rimanere assorbita ci dà la misura del suo *potere penetrante*.

Illustriamo il potere penetrante di due tipi di raggi a tutti conosciuti: i raggi luminosi e i raggi X. I primi ci provengono dal sole dopo avere attraversata tutta l'atmosfera terrestre: evidentemente uno spessore di 80 chilometri di aria non è capace di assorbire sensibilmente la luce. I raggi luminosi invece non possono attraversare in genere i corpi solidi, anche se non sono molto spessi (fanno eccezione poche sostanze del tipo del vetro, che non assorbono la luce e che appunto per questo si dicono trasparenti). Così gli scuretti di legno di una finestra sono sufficienti per *far buio* in una stanza, e cioè per schermare completamente la luce. In particolare i raggi luminosi non

sono capaci di attraversare il corpo umano ed è questa la ragione per cui noi non vediamo i nostri polmoni, il nostro cuore, le nostre ossa. I raggi X invece possono attraversare la parte muscolare del nostro corpo e vengono fermati solo dalle parti ossee. I medici perciò usano abitualmente i raggi X per fare osservazioni all'interno del corpo umano: se per esempio si manda un fascio di raggi X sopra l'individuo in osservazione e dietro ad esso si pone una grande lastra fotografica, i raggi X attraverseranno il corpo e andranno ad impressionare la lastra. Le ossa però fermeranno i raggi X e in corrispondenza di esse troveremo la lastra non impressionata. Si può dire dunque che i raggi X hanno potere penetrante maggiore che non i raggi luminosi.

Lord RUTHERFORD trovò che le radiazioni radioattive non sono capaci di attraversare tutte lo stesso spessore di sostanza; facendo le sue esperienze con lastre di alluminio, egli si accorse che variando lo spessore delle lastre, variavano le quantità di raggi capaci di attraversarle. Un gruppo di radiazioni infatti veniva già assorbito da una sottile lamina di alluminio, spessa 0,01 mm.; le altre radiazioni invece potevano attraversare lastre anche più spesse di queste: quando però lo spessore dell'alluminio raggiungeva circa 1 mm., un altro gruppo di radiazioni restava completamente assorbito. I raggi che avevano attraversato anche questa ultima lastra e che erano dunque i più

penetranti, resterebbero assorbiti soltanto da uno strato di alluminio di 10 cm. I tre gruppi di radiazioni, distinti dal loro potere penetrante, furono chiamati rispettivamente raggi *alfa*, raggi *beta* e raggi *gamma*.

L'esperienza più classica, e per così dire più scolastica, con la quale attualmente si mettono in evidenza i tre tipi di radiazioni, non è più basata sul loro potere penetrante, ma sulle loro diverse proprietà elettriche. Prendiamo un blocchetto di piombo nel quale facciamo una piccola cavità, e dentro questa poniamo un granulo di sostanza radioattiva. Il blocchetto di piombo assorbe tutte le radiazioni emesse dalla sostanza; queste dunque potranno uscire soltanto dalla apertura della cavità, in forma di un sottile fascetto, e in direzione rettilinea. Mettiamo ora il blocchetto fra due lastre metalliche parallele, collegate con gli estremi di una pila, in modo che l'una resti carica positivamente e l'altra negativamente (fig. 3); il fascetto si dividerà in tre altri fascetti; di questi uno si inclina verso la lastra positiva, uno prosegue in linea retta, e l'ultimo si piega verso la lastra negativa. La deviazione dei fascetti può essere messa in evidenza sia per la capacità che hanno le radiazioni radioattive di impressionare una lastra fotografica, sia con un altro metodo che illustreremo in seguito, il quale permette di rendere visibile tutto il cammino dei raggi.

Da questa esperienza risultò che il fascetto che veniva attirato dalla lastra positiva doveva essere costituito di cariche negative, mentre quello che si inclinava verso la lastra negativa portava invece cariche positive. I raggi positivi si identificano

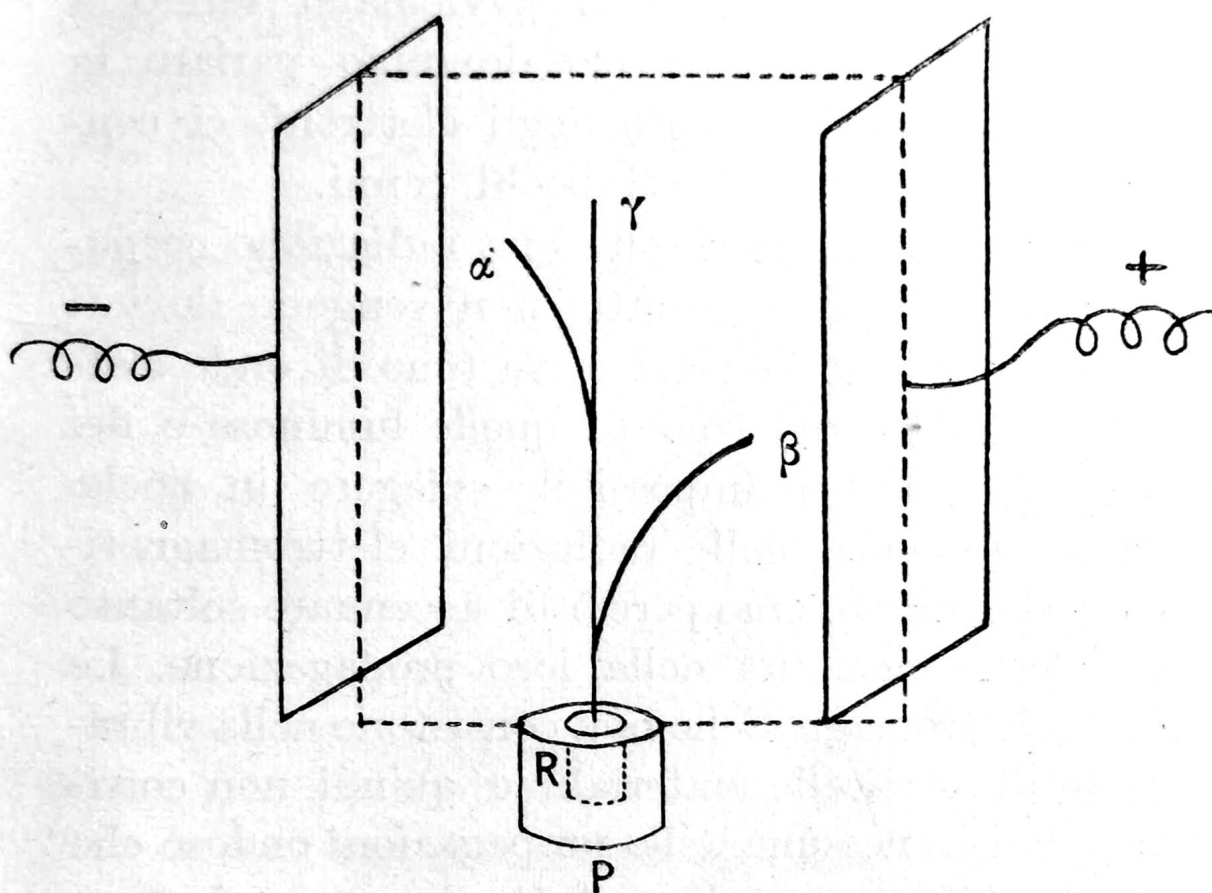



Fig. 3. — Come si dividono le radiazioni radioattive in un campo elettrico.

con quelli di minimo potere penetrante, cioè con i raggi *alfa*; i raggi negativi sono quelli di potere penetrante intermedio, cioè i raggi *beta*, e quelli che non vengono deviati, e che quindi non portano cariche elettriche, si identificano con i raggi *gamma*.

Fu più facile individuare la natura dei raggi

beta e *gamma* che non quella dei raggi *alfa*. Infatti ben presto fu riconosciuto che i raggi *beta* sono costituiti da un fascio di elettroni che possono avere velocità variabile: alcune sostanze radioattive liberano particelle *beta* che hanno una velocità tanto grande da avvicinarsi molto a quella della luce. Siccome dovremo parlare in seguito più diffusamente degli elettroni, ci contenteremo qui di questi pochi cenni.

I raggi *gamma* non sono una radiazione corpuscolare, e, come si è detto, non vengono deviati dal campo elettrico; essi consistono di onde elettromagnetiche del tipo di quelle luminose e dei raggi X. Sarebbe impossibile spiegare in poche parole l'essenza delle radiazioni elettromagnetiche; ci contenteremo perciò di accennare soltanto ad alcune modalità della loro propagazione. Le onde elettromagnetiche non consistono nella vibrazione di particelle materiali, e quindi non corrispondono a nessuna delle propagazioni ondose che siamo abituati a vedere; tuttavia, per spiegarne alcune proprietà, è comodo fare un paragone che, se per molti non è nuovo, è sempre quello che meglio serve a rappresentare il fenomeno della propagazione di onde irradiantesi da un punto. E precisamente soffermiamoci a considerare cosa accade sulla superficie di uno stagno quando si getta in esso un sasso. Nel punto di caduta del sasso si formano delle successive onde circolari, le quali si vanno man mano allargando e allontanando dal centro

di formazione; il numero di onde che si è formato in un secondo può essere maggiore o minore; esso può trovarsi materialmente contando le onde che in un secondo vengono a rompersi sulla riva dello stagno: si comprende intuitivamente che questo numero, cioè la «frequenza» delle onde, dipende dalla velocità con cui le onde si propagano e dalla distanza che c'è tra un'onda e l'altra, distanza che prende il nome di «lunghezza d'onda»; e precisamente «la frequenza è tanto più grande quanto maggiore è la velocità delle onde e quanto più piccola è la loro rispettiva distanza».

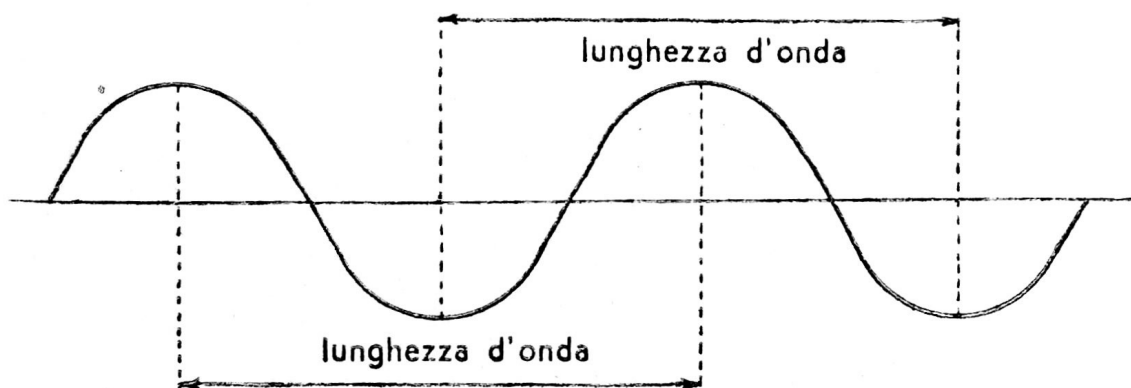



Fig. 4. — Propagazione ondosa.

Nel caso delle onde elettromagnetiche le cose sono più complicate, poichè le onde non si propagano su di un piano, come nello stagno, ma nello spazio; esse quindi non saranno circolari, ma sferiche; sostanzialmente però vale una legge analoga a quella precedentemente enunciata. Le onde elettromagnetiche si propagano tutte con la velocità di 300.000 km. al secondo; per esse quindi

la frequenza dipende soltanto dalla lunghezza d'onda. Le radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda più grande, e quindi di minor frequenza, sono quelle usate in radiotelegrafia; proseguendo verso le lunghezze d'onde minori, si trovano le radiazioni infrarosse, e successivamente le visibili. Queste sono comprese entro due limiti ben definiti di frequenza: quella della luce rossa, che è di $4,3 \times 10^{14}$ onde per secondo, costituisce il limite inferiore, mentre quello superiore è dato dalla frequenza della luce violetta, che è di $7,5 \times 10^{14}$. Radiazioni con frequenza maggiore di queste non sono più visibili; esse costituiscono, in ordine di frequenza crescente, i raggi ultravioletti, i raggi X e i raggi *gamma*. Questi ultimi sono dunque le radiazioni elettromagnetiche che hanno la maggior frequenza o, come suol dirsi, le radiazioni più « dure »; in conseguenza esse hanno anche il maggior potere penetrante.

I primi studi sulle particelle *alfa* portarono solo a determinarne alcune proprietà, oltre al potere penetrante, già misurato da RUTHERFORD: esse sono corpuscoli materiali, assai più pesanti delle particelle *beta*, e carichi di elettricità positiva; la velocità di cui sono animate varia da circa 12.000 a 20.000 chilometri al secondo.

La natura di queste particelle fu stabilita

" L'alchimista " di Giovanni Stradano (Firenze - Palazzo Vecchio).

con certezza solo più tardi, in seguito ad una esperienza fatta da Lord RUTHERFORD con l'aiuto del fisico ROYDS. Essi si servirono di un apparecchio rappresentato schematicamente nella fig. 5. Un tubicino di vetro *A*, con pareti sufficientemente sottili per lasciare passare le particelle *alfa*, è contenuto in un tubo più grande, anche esso di vetro, il quale, pur lasciando uscire le radiazioni *beta* e *gamma*, assorbe le *alfa*. In *A* si metteva del radio e in *T* veniva fatto il vuoto con una pompa pneumatica; due giorni dopo l'introduzione del radio nel tubicino *A* si trovò che il tubo esterno *T* conteneva del gas. Questo fatto era in realtà già stato previsto in seguito ad osservazioni fatte da altri fisici; RUTHERFORD e ROYDS avevano perciò posto in comunicazione col tubo *T* un altro tubicino *S*, nel quale spinsero con la pompa pneumatica il gas, in modo da ottenerlo in sufficiente concentrazione per lo studio spettroscopico; si

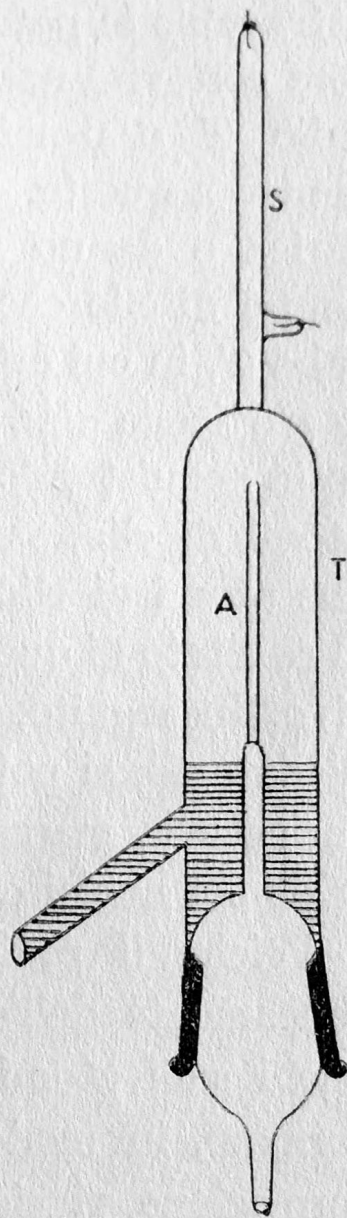



Fig. 5. — Apparecchio di Rutherford e Royds. Le particelle alfa emesse dal radio contenuto nel tubicino A, giungendo nelle pareti del tubo T, si neutralizzano, dando luogo a elio gassoso.

riconobbe così che il gas raccolto nel tubo T era elio.

L'esperienza fu interpretata al modo seguente. Le particelle *alfa* sparate, per così dire, dal radio attraverso le pareti del tubicino A, vanno a sbattere con violenza contro le pareti più spesse del tubo T e penetrano per un brevissimo tratto dentro a queste. In tal modo esse perdono la loro carica e danno luogo alla formazione di atomi neutri di elio che vengono riespulsi dal vetro nel tubo T, in cui era stato fatto il vuoto. Se dunque le particelle *alfa*, perdendo la loro carica positiva, ossia acquistando degli elettroni, si trasformano in atomi di elio, vuol dire che esse non sono altro che atomi di elio a cui mancano degli elettroni. Il risultato di queste esperienze non è che qualitativo. In seguito, quando si conobbe la struttura dell'atomo, si potè stabilire quantitativamente la carica e la massa delle particelle *alfa* e identificarle coi nuclei di elio.

Poichè il radio è capace di produrre spontaneamente dell'elio gassoso, bisogna ammettere che i suoi atomi si possano intimamente trasformare, in modo che fra i prodotti della trasformazione vi siano atomi di elio. Questo fatto riapre la via alle idee degli alchimisti, mostrando che non solo è possibile, ma avviene spontaneamente la trasformazione di alcuni elementi in altri di natura chimica completamente diversa.

Capitolo III

L'ATOMO

Fino alla seconda metà del secolo XIX si pensava generalmente che l'atomo fosse l'ultima particella costituente la materia non ulteriormente decomponibile. Verso la fine del secolo scorso invece l'attenzione dei fisici fu richiamata sopra alcuni fenomeni, per la cui interpretazione parve opportuno ammettere che anche l'atomo fosse costituito di elementi più piccoli.

Molti fenomeni infatti, fra cui quelli radioattivi, dei quali si è parlato nel precedente capitolo, indicavano che nell'interno dell'atomo dovessero essere contenute delle particelle cariche elettricamente. Prima quindi di tentare di costruire un modello, per mezzo del quale si riuscisse a rendere conto delle diverse proprietà fisiche e chimiche dell'atomo, i fisici determinarono le proprietà e la natura dei corpuscoli elettrizzati di cui esso è costituito.

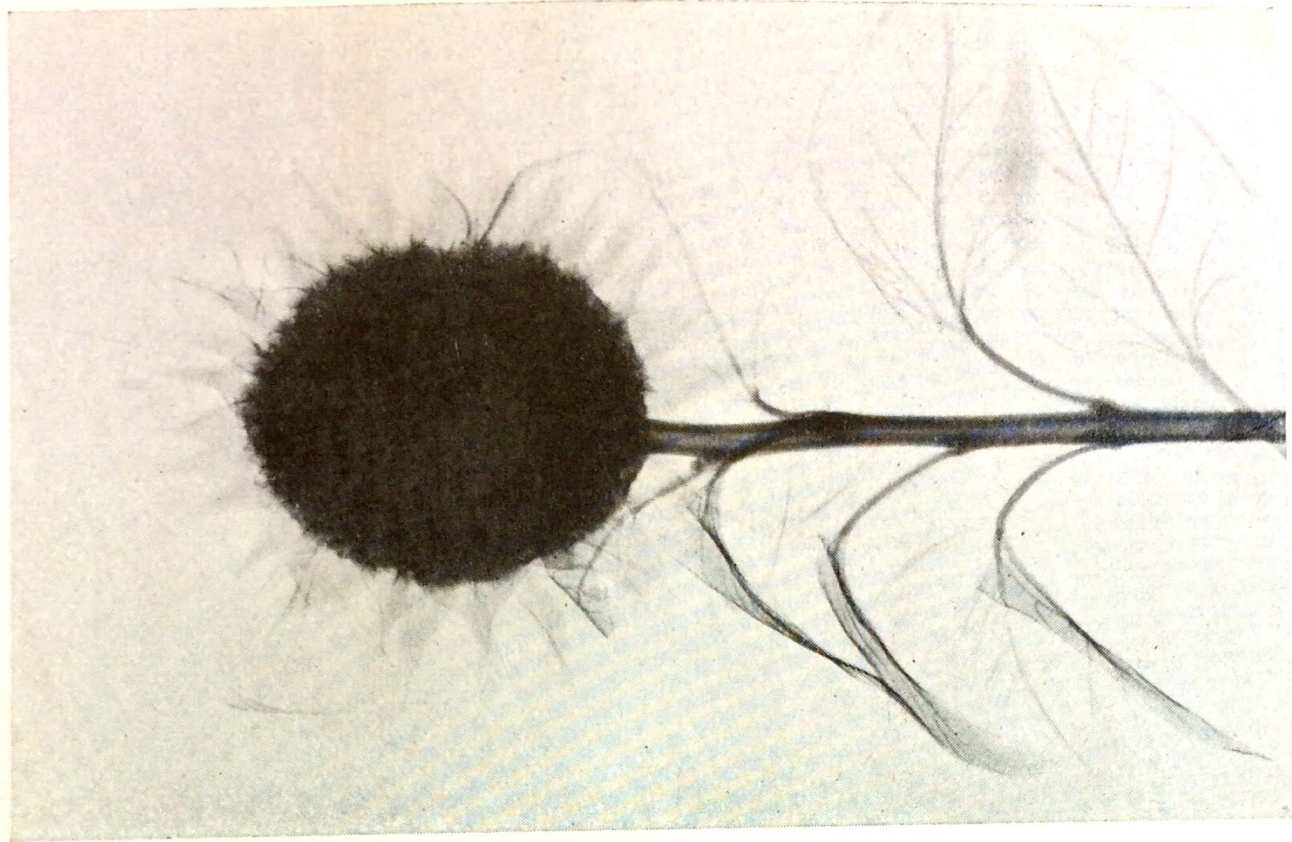
Poichè l'atomo nel suo complesso è elettricamente neutro, bisogna ammettere che, se in esso sono contenute particelle, alcune debbono essere

cariche positivamente ed altre negativamente, per modo che la carica totale sia zero. Lo studio delle particelle negative si presenta più agevole di quello delle particelle positive, perchè tali corpuscoli si possono facilmente ottenere isolati fuori della materia. Essi furono indipendentemente scoperti, nel 1897, da J. J. THOMSON ed E. WIECHERT, i quali studiavano i fenomeni che si accompagnano al passaggio di una scarica elettrica in un gas rarefatto; a questi corpuscoli è stato dato il nome di « elettroni ». Essi si possono ottenere liberi artificialmente, per esempio arroventando un metallo, o facendolo colpire da luce ultravioletta, e vengono emessi spontaneamente, come si è già visto, dalle sostanze radioattive (raggi *beta*); talvolta grandi sciami di elettroni di origine solare vanno a colpire l'atmosfera terrestre dando luogo al fenomeno delle aurore boreali. Gli elettroni delle più disparate provenienze sono tutti identici tra loro: con diversi metodi si è misurata la loro carica e la loro massa; quest'ultima è risultata circa 1800 volte minore della massa dell'atomo di idrogeno, il più leggero che si conosca. Anche la quantità di elettricità portata da un singolo elettrone è molto piccola: per avere un'idea della piccolezza di questa carica (negativa), basta pensare che nel filamento di una comune lampadina elettrica da tavolo passano in ogni secondo tanti elettroni quante gocce d'acqua sono passate sotto il ponte Milvio dal 1870 fino ad oggi.

a)

ROETGENOGRAFIE

a) Scheletro di una rana osservato con raggi X.

b) Un girasole.

b)

Stabilite le proprietà dei corpuscoli che portano l'elettricità negativa, si imponeva lo studio della elettricità positiva, che necessariamente deve essere presente nell'atomo, poichè esso ci appare neutro. Ma pochissimi fatti sperimentali aiutavano a determinare come questa elettricità fosse distribuita, e quali fossero i rapporti di posizione e di interazione fra le cariche positive e quelle negative. Una prima ipotesi sulla struttura della carica positiva fu proposta dal fisico inglese J. J. Thomson. Egli ammetteva che l'atomo fosse costituito da una sfera di elettricità positiva, distribuita uniformemente, dentro la quale fossero immersi gli elettroni, come i semi nell'interno di un frutto. Questa teoria però dovette in seguito venire abbandonata, essendosi trovata in contrasto con numerosi fatti sperimentali, tra cui i fenomeni che si osservano nel passaggio delle particelle *alfa* attraverso la materia. Furono appunto questi ultimi fenomeni che nel 1911 suggerirono al fisico inglese Rutherford quella ipotesi sulla struttura atomica, che ancora oggi, almeno nelle sue linee essenziali, si ritiene rispondente alla realtà.

Già nel capitolo precedente abbiamo detto che le particelle *alfa* sono cariche positivamente, e che si identificano con i nuclei di elio. Torneremo in seguito a parlarne più dettagliatamente; ma intanto premettiamo che esse hanno una carica elettrica, il cui valore è uguale al doppio della

carica dell'elettrone ed una massa circa 7000 volte più grande; questi corpuscoli vengono proiettati con grandissima velocità dagli atomi in alcuni processi di disintegrazione radioattiva. Supponiamo ora che una particella *alfa* passi in vicinanza di un atomo; poichè essa è carica positivamente subirà un'azione di repulsione da parte delle cariche positive dell'atomo, ed un'azione di attrazione da parte delle cariche negative, cioè degli elettroni, e devierà quindi dalla sua traiettoria. Ora queste azioni risultano molto differenti a seconda della ipotesi che si fa sopra la distribuzione dell'elettricità positiva (fig. 6): supponiamo per un momento che, corrispondentemente al modello atomico di THOMSON, l'elettricità positiva sia uniformemente distribuita entro una sfera grande come l'atomo, e che la particella

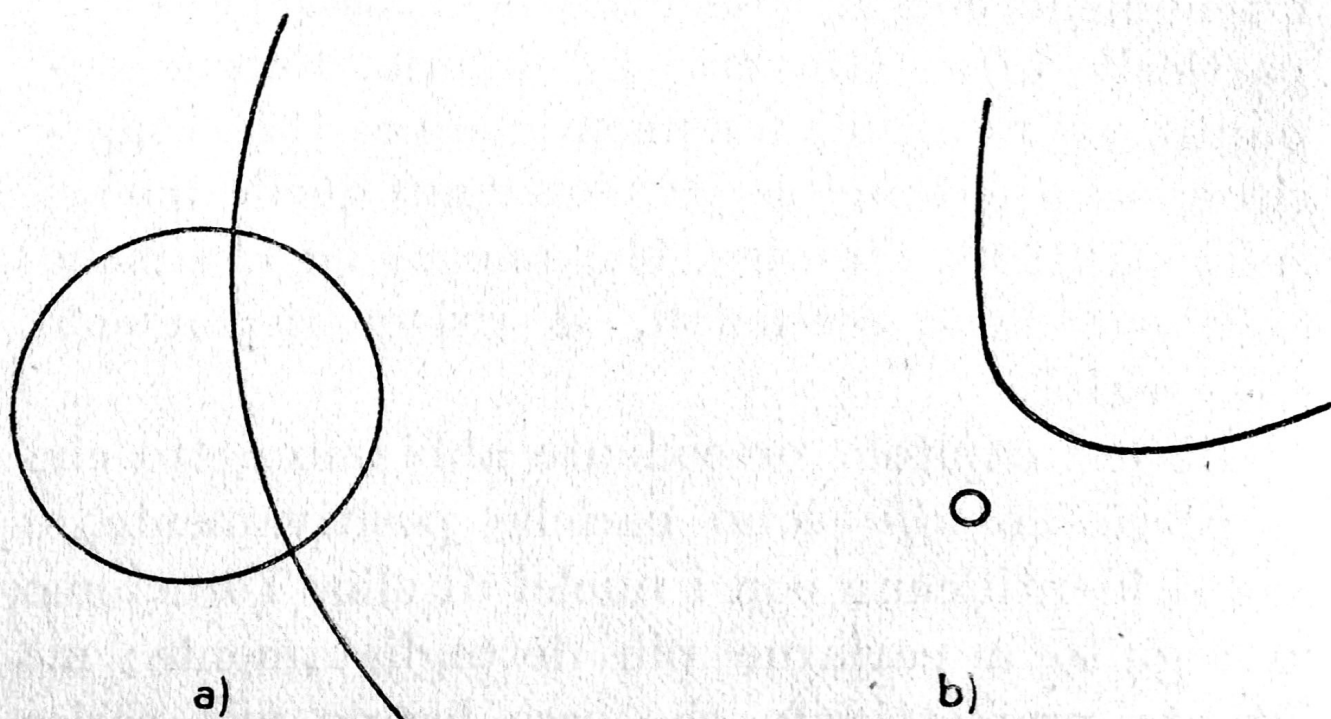



Fig. 6. — Distribuzione dell'elettricità positiva secondo Thomson e secondo Rutherford.

alfa urti questo atomo penetrando nel suo interno fino a poca distanza dal centro. La forza elettrica repulsiva che agisce sul corpuscolo nell'interno dell'atomo diminuisce man mano che essa si avvicina al centro, in modo che in definitiva la traiettoria della particella *alfa* subirà soltanto una lieve inflessione, come è mostrato dalla figura (6 *a*).

Il RUTHERFORD però, in seguito a numerose esperienze, concluse che i fatti sperimentali sono in completa contraddizione con le previsioni a cui siamo stati condotti accettando il modello atomico di THOMSON; poichè in realtà la traiettoria della particella *alfa* subisce una deflessione molto più considerevole di quella prevista (6 *b*). Questa traiettoria, però, poteva essere teoricamente calcolata in modo perfettamente rispondente alla esperienza, sostituendo alla ipotesi del THOMSON quella avanzata dal RUTHERFORD, secondo la quale l'elettricità positiva sarebbe tutta concentrata nel centro dell'atomo, in una regione piccolissima.

Partendo da tale ipotesi il RUTHERFORD costruì il seguente modello atomico: nell'atomo si trova un nucleo centrale, carico positivamente, nel quale è contenuta quasi tutta la massa atomica, ed un certo numero di elettroni, i quali portano la carica negativa; un atomo però è elettricamente neutro; perciò il numero di elettroni in esso contenuto è tale da neutralizzare completamente la carica positiva del nucleo. La forza

che tiene legati gli elettroni al nucleo centrale, pur essendo di origine elettrica, è dello stesso tipo della forza di gravitazione che tiene i pianeti legati al sole e che li costringe a ruotare attorno ad esso; anche gli elettroni perciò descrivono delle orbite attorno al nucleo, il quale resta praticamente immobile a causa della sua grande massa. Secondo il modello di RUTHERFORD quindi dobbiamo figurarci l'atomo come una specie di microscopico sistema planetario, in cui il nucleo ha la posizione del sole, e gli elettroni quella dei pianeti.

I nuclei dei vari elementi chimici non sono tutti eguali tra loro, ma differiscono sia per la massa che per la carica; per potere misurare queste due grandezze è necessario fissare due quantità che si assumeranno rispettivamente come unità di carica e unità di massa. Poichè l'elettrone è la più piccola quantità di elettricità che si conosca, lo si assume come unità di carica; e poichè d'altra parte la carica dell'elettrone è, come sappiamo, negativa, essa si indicherà con -1; e con $+1$ si indicherà l'unità di carica elettrica positiva, che è uguale, a parte il segno, a quella dell'elettrone; quando dunque si dirà, per esempio, che un nucleo ha carica $+5$, si intenderà che la sua carica è uguale, in valore assoluto, a quella di 5 elettroni; e intorno a questo nucleo dovranno ruotare cinque elettroni, perchè si possa formare un atomo elettricamente neutro. Al numero che

rappresenta il valore della carica positiva di un nucleo atomico, numero che coincide col numero di elettroni planetari, si dà il nome di « numero atomico ». Questo numero fondamentale varia da 1 per l'elemento più semplice che si conosca, l'idrogeno, fino a 92 per il più complesso degli elementi conosciuti (l'uranio).

L'atomo di idrogeno è costituito da un nucleo centrale di carica +1 e da un solo elettrone che gli gira intorno; il nucleo di idrogeno, a cui RUTHERFORD diede, nel 1921, il nome di « protone », è considerato come una particella semplice, che non può venire ulteriormente divisa, e che entra a far parte di tutti gli altri nuclei, come uno dei principali costituenti. Per questa ragione la massa del protone si assume, in tutte le considerazioni atomiche, come unità di massa: quando dunque, per esempio, si dirà che un nucleo ha massa 27, si intenderà che la sua massa è 27 volte maggiore di quella del protone. Per farsi un'idea della piccolezza di questa massa unitaria, basta pensare che se potessimo mettere sul piatto di una sensibile bilancia ad ogni secondo un mucchietto di un milione di protoni, e continuassimo questa operazione notte e giorno, senza interromperci mai, soltanto dopo 300 milioni di secoli l'indice della bilancia segnerebbe il peso di un grammo.

La massa degli elettroni è talmente piccola, in confronto di quella nucleare, che la si può

in pratica trascurare; la massa di un atomo coincide dunque con quella del suo nucleo: così il peso dell'atomo di idrogeno si considera eguale a 1 come quello del protone.

Abbiamo visto che l'elemento più semplice che si conosca, l'idrogeno, è costituito da un nucleo centrale carico positivamente, attorno al quale ruota un solo elettrone; l'elemento più semplice dopo l'idrogeno, è l'elio, il quale è formato da un nucleo centrale, di carica +2, attorno al quale ruotano due elettroni. Il peso atomico dell'elio è 4: ciò vuol dire che l'atomo di questo elemento è quattro volte più pesante dell'atomo di idrogeno, che è stato scelto come unità di misura.

L'elemento che viene dopo l'elio è il litio, il quale ha un nucleo centrale, di carica +3, e tre elettroni satelliti; e così di seguito per tutti gli altri elementi esistenti in natura, fino all'uranio, che è il più complesso e che è costituito da un nucleo centrale, di carica +92, e da 92 elettroni satelliti.

***

Il modello atomico di RUTHERFORD dava soltanto la costituzione di un atomo, ma non forniva le leggi con le quali gli elettroni ruotano attorno al nucleo. Avendo paragonato l'atomo ad un sistema planetario, la cosa più ovvia e che per prima viene in mente, è di supporre che le leggi

con cui gli elettroni ruotano intorno al nucleo siano le stesse leggi che tengono i pianeti legati, per così dire, al sole; di pensare cioè che anche nel mondo atomico si possano introdurre le leggi della meccanica dei corpi ordinari, la quale, nel linguaggio dei moderni fisici, prende il nome di meccanica classica. Però, poichè gli elettroni e i nuclei sono elettricamente carichi, secondo le leggi della meccanica classica gli elettroni nel loro moto di rotazione dovrebbero perdere continuamente energia e avvicinarsi sempre più al nucleo, in modo che finirebbero col cadervi dentro, distruggendo l'atomo. Poichè questo non avviene, dobbiamo ammettere che nell'interno dell'atomo valgano leggi diverse da quelle classiche: queste leggi furono proposte per la prima volta nel 1913 dal danese NIELS BOHR (premio Nobel per la fisica) ed enunciate poi in forma più generale dal tedesco ARNOLD SOMMERFELD.

Vediamo brevemente in che cosa esse consistano. In generale si potrebbe pensare che, per esempio nel caso dell'idrogeno, l'elettrone satellite potesse percorrere una qualsiasi orbita intorno al nucleo. Invece secondo la teoria di BOHR-SOMMERFELD, la quale ha trovato una piena conferma sperimentale nei campi più svariati della fisica, l'elettrone può, costretto da certe leggi, percorrere soltanto alcune determinate orbite. L'elettrone ha energie diverse a seconda che ruota su una o su un'altra di queste; l'energia minore compete all'orbita in-

terna, e diventa sempre più grande man mano che il raggio dell'orbita aumenta, assumendo i valori determinati dalle leggi di BOHR-SOMMERFELD. Secondo che l'elettrone si trova sulle diverse orbite, l'atomo si trova in diversi « stati quantici ».

Non solo le orbite a disposizione degli elettroni sono in numero determinato, ma un'altra condizione limita la possibilità della loro scelta. Il

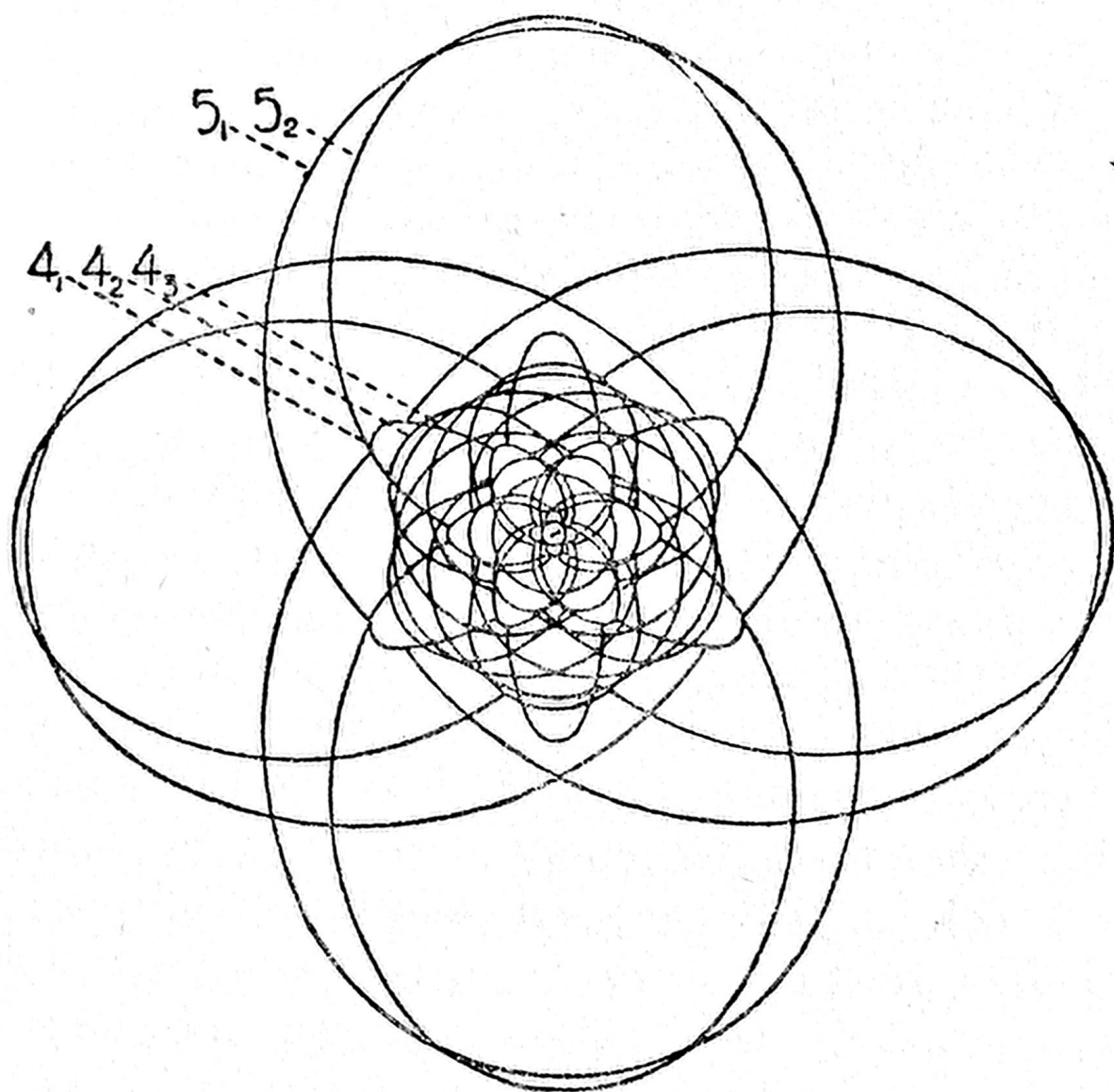
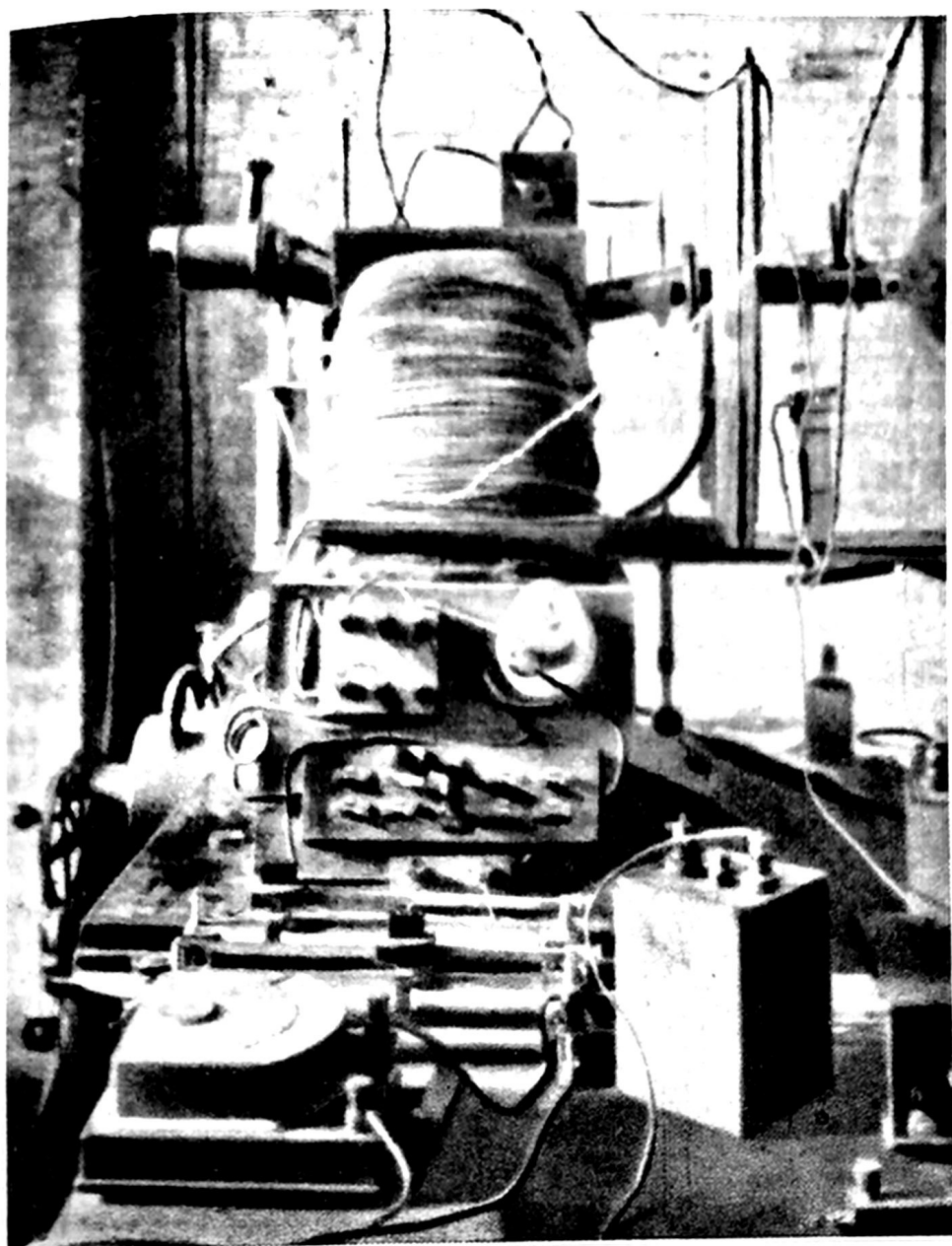
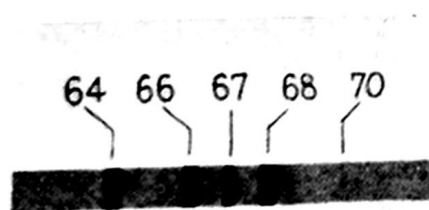
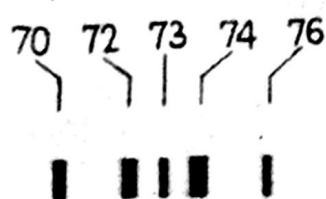



Fig. 7. — Schema delle orbite percorse dagli elettroni planetari di un atomo di xeno.

Uno degli spettrografi di massa di Aston. (*Aston*)

Spettri dello zinco e del germanio, ottenuti da Bainbridge con lo spettrografo di massa. I numeri posti in corrispondenza dei tratti più scuri indicano i pesi atomici dei vari isotopi.

(*Aston*)

principio di PAULI o di esclusione afferma infatti che su ogni orbita non può ruotare che un solo elettrone; uno di essi quindi potrà scegliere solo una delle orbite possibili, la quale ancora non sia occupata. Generalmente, cioè se non vi sono delle speciali cause esterne che producano delle perturbazioni, l'elettrone va ad occupare l'orbita libera più vicina al nucleo. Così nell'atomo di idrogeno l'elettrone esterno andrà ad occupare la prima orbita libera, cioè quella più vicina al nucleo. Passando dall'idrogeno agli elementi successivi, il numero atomico, cioè il numero degli elettroni esterni, aumenta, ed essi vanno ad occupare ordinatamente orbite via via più esterne.

L'insieme delle orbite per le quali l'energia ha valori quasi uguali forma uno « strato » o « anello elettronico »; gli strati vengono contrassegnati con le lettere K, L, M, ecc..., man mano che si procede da quelli più interni a quelli più esterni. Ogni strato contiene un numero determinato di orbite e quindi di elettroni, poichè, come abbiamo detto, su ogni orbita può ruotare soltanto un elettrone; precisamente il primo strato, K, non può contenere più di 2 elettroni; il secondo, L, più di 8; il terzo, M, più di 18, ecc.; in modo che nell'elemento di numero atomico 2, l'elio, il secondo elettrone andrà ad occupare anche esso il primo strato, il quale sarà così completo; nel litio, di numero atomico 3, il terzo elettrone, non trovando

posto nel primo strato K, già completo, ruoterà sull'orbita più interna del secondo strato L, e l'elemento di numero atomico 4 avrà il primo strato sempre completo con due elettroni, e il secondo con altri due elettroni; l'elemento di numero atomico 5 avrà tre elettroni sul secondo strato, e così di seguito fino all'elemento 10, il quale avrà i primi due strati completi, il più interno con due elettroni ed il secondo con otto. E lo stesso ragionamento potrebbe continuarsi per tutti i successivi elementi fino all'uranio.

Consideriamo per un momento i seguenti elementi: idrogeno, litio, sodio, rispettivamente di numero atomico 1, 3, 11 (ricordiamo che il numero atomico è uguale al numero di elettroni planetari); l'idrogeno ha un nucleo centrale ed un elettrone nel primo strato; il litio, da un certo punto di vista, si può considerare analogo all'idrogeno in quanto ha anche esso un solo elettrone nello strato più esterno, ruotante attorno ad una formazione stabile, costituita in questo caso da un nucleo e da uno strato già completo; e così anche per il sodio, il quale ha un solo elettrone nello strato esterno, ruotante attorno alla formazione stabile costituita dal nucleo e dai due primi strati completi; e poichè le proprietà chimiche dei diversi elementi dipendono dalla disposizione degli elettroni satelliti, gli elementi idrogeno, litio, sodio, avranno proprietà chimiche affini. Analogamente, quanto si è detto si può ripetere per gli elementi

SISTEMA PERIODICO DEGLI ELEMENTI

Periodo	Riga	Gruppo I		Gruppo II		Gruppo III		Gruppo IV		Gruppo V		Gruppo VI		Gruppo VII		Gruppo VIII	Gruppo O
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b		
I.	1	1 H 1,008															2 He 4,00
II.	2	3, Li 6,94		4 Be 9,01		5 B 10,82		6 C 12,00			7 N 14,008		8 O 16,000		9 F 19,00		10 Ne 20,2
III.	3	11 Na 23,00		12 Mg 24,32		13 Al 27,1		14 Si 28,06			15 P 31,04		16 S 32,07		17 Cl 35,46		18 A 39,88
IV.	4	19 K 39,10		20 Ca 40,07		21 Sc 45,1		22 Ti 48,1		23 V 51,0		24 Cr 52,0		25 Mn 54,93		26 Fe 55,84 27 Co 58,97 28 Ni 58,68	
	5		29 Cu 63,57		30 Zn 65,37		31 Ga 69,73		32 Ge 72,5		33 As 74,96		34 Se 79,2		35 Br 79,92		36 Kr 82,9
V.	6	37 Rb 85,45		38 Sr 87,63		39 Y 88,7		40 Zr 90,6		41 Nb 93,5		42 Mo 96,0		43 Ma		44 Ru 101,7 45 Rh 102,9 46 Pd 106,7	
	7		47 Ag 107,88		48 Cd 112,4		49 In 114,8		50 Sn 118,7		51 Sb 121,8		52 Te 127,5		53 J 126,92		54 X 130,2
VI.	8	55 Cs 132,8		56 Ba 137,4		57 La 138,9		58 Ce 140,2		59 Pr 140,9		60 Nd 144,3	61*	62 Sm 150,4		63 Eu 152,0 64 Gd 157,3 65 Tb 159,2	66 Dy 162,45
	9	67 Ho 163,5		68 Er 167,1	69 Tu 169,4	70 Yb 173,5	71 Lu 170,0	72 Hf 179		73 Ta 181,5		74 W 184,0		75 Re 188,71		76 Os 190,9 77 Ir 193,1 78 Pt 195,2	
	10		79 Au 197,2		80 Hg 200,6		81 Tl 204,4		82 Pb 207,2		83 Bi 209,0		84 Po (210)		85 *		86 Em (222)
VII.	11	87 *		88 Ra 226			89 Ac (227)		90 Th 232,1	91 Pa (231)		92 U 238,2					

che hanno due elettroni nello strato più esterno, i quali avranno tra di loro proprietà chimiche analoghe.

Ordiniamo ora tutti i 92 elementi conosciuti secondo il loro numero atomico, in ordine crescente, scrivendo in colonna gli elementi che hanno lo stesso numero di elettroni nell'orbita più esterna: avremo una tabella la quale coincide perfettamente con la tabella che il chimico russo MENDELEJEW aveva costruito su basi puramente empiriche nel 1868 (sistema periodico degli elementi). Come si vede quindi il modello atomico di RUTHERFORD, completato dalle leggi di BOHR-SOMMERFELD, riceve una brillantissima conferma dai risultati sperimentali.

Abbiamo già detto che al crescere del raggio di un'orbita aumenta il valore dell'energia che le compete: se dunque, per una qualsiasi causa esteriore, l'elettrone satellite dell'idrogeno passa a ruotare dalla prima alla seconda orbita, esso deve acquistare una quantità di energia eguale alla differenza fra le loro energie. Quando l'elettrone è sulla seconda orbita, non ha una posizione stabile, perciò prima o poi torna a ruotare sulla prima e compie dunque un processo inverso al precedente: sulla seconda orbita esso aveva una energia maggiore di quella che gli occorre ora che è sulla

prima e perciò emette il sovrappiù di energia. Una cosa analoga accade se l'elettrone si trova sulla terza, sulla quarta o su di un'orbita anche più esterna; esso finisce sempre col saltare sulla più interna: naturalmente in questo caso il valore dell'energia emessa sarà la somma delle energie che competerebbero ai singoli passaggi dalla quarta alla terza orbita, dalla terza alla seconda, dalla seconda alla prima. Quanto si è detto per l'unico elettrone dell'idrogeno potrebbe ripetersi per tutti gli elettroni dei vari atomi: quando uno di essi occupa un'orbita più esterna di quella normale, la sua posizione è instabile e l'atomo si dice « eccitato ».

Un esempio un po' grossolano si potrebbe fare paragonando l'insieme delle orbite elettroniche a una gradinata circolare, come quella di uno stadio, con gradini di altezza irregolare; le orbite di energia maggiore corrisponderebbero agli scalini in cima alla gradinata; infatti l'energia potenziale di un corpo posto su di essi, è maggiore di quella che competerebbe allo stesso corpo qualora si trovasse sugli scalini più bassi, così come è maggiore l'energia degli elettroni sulle orbite più esterne. Gli strati elettronici sarebbero rappresentati da gruppi di scalini di piccolissimo dislivello. Questo esempio che materializzerebbe abbastanza bene le condizioni dell'atomo, ha il difetto di non essere esatto: le orbite degli elettroni infatti possono essere non solo circolari ma anche

ellittiche e in realtà le orbite dei diversi strati vengono, in alcuni casi, a intersecarsi tra loro. Tuttavia possiamo considerare che la gradinata ci dia una prima approssimata rappresentazione degli strati elettronici, alla quale ricorriamo in mancanza di un paragone più corrispondente al vero. Se ora in cima a questa gradinata mettiamo una palla di gomma, che ci rappresenti l'elettrone, la palla si troverà in una posizione instabile, e alla più piccola spinta verrà giù per tutta la gradinata, saltando di scalino in scalino fino a che non avrà raggiunto il fondo, dove si fermerà.

Ciò che abbiamo detto per l'unico elettrone dell'idrogeno si può ripetere per gli elettroni satelliti di tutti gli altri elementi: naturalmente un elettrone potrà saltare su di un'orbita soltanto a condizione che questa sia libera.

Lo stesso atomo può emettere, se è stato eccitato, una quantità di energia che può assumere valori diversi, poichè un elettrone può compiere il passaggio tra diverse coppie di orbite; anche la palla di gomma del nostro esempio può compiere salti di diversa altezza a seconda dello scalino su cui si trova e del dislivello esistente tra questo e quello su cui salta. Ma i salti che essa può fare sono sempre di altezze determinate, perchè i dislivelli tra i vari scalini sono fissi e non possono variarsi a piacere: per esempio la palla potrà fare un salto di 40 centimetri solo se esistono due scalini il cui dislivello sia appunto 40 centimetri.

In un atomo le varie orbite hanno energie ben determinate, quindi l'elettrone potrà anch'esso compiere dei salti di dislivello fisso e in corrispondenza a ciò potrà emettere solo alcuni determinati valori di energia. Così, una certa energia E può essere emessa da un elettrone solo se esistono nell'atomo due orbite libere, tali che la loro differenza di energia sia E.

La quantità di energia che viene emessa da un atomo quando un elettrone compie uno di questi passaggi, prende il nome di « quanto di energia » o « fotone ». Esso viene emesso in forma di onde elettromagnetiche che hanno frequenza tanto maggiore quanto maggiore è l'energia del quanto. A rischio di diventare noiosi vogliamo insistere sul concetto di quanto di energia: esso, come dice il suo nome stesso, è una quantità, ma una quantità sempre intera, che non si può spezzare: l'atomo emette un quanto in un processo unico e non può emetterne un quarto o mezzo alla volta: in questo senso i quanti acquistano una individualità propria e la loro emissione può quasi paragonarsi all'uscita di persone da una stanza: potremo farne uscire una persona grande o una piccola, o due o tre persone, ma non mezza o un quarto e nemmeno potremo fare uscire una persona che non sia presente nella stanza (il che corrisponde a voler far uscire dall'atomo un quanto di grandezza diversa da tutte le differenze di energie fra le possibili coppie di orbite dell'atomo).

Il paragone tra un quanto e una persona potrebbe portarci a sopravalutare la grandezza del quanto: essa è estremamente piccola e non potremmo in alcun caso accorgerci dell'emissione di un singolo quanto. In genere però la stessa causa che porta l'elettrone di un atomo su di un'orbita più esterna del normale, porta anche gli elettroni degli altri atomi costituenti il corpo sulle orbite corrispondenti; in modo che quando questi elettroni, che si trovavano in una posizione instabile, cadono sulla loro orbita normale emettono un numero stragrande di quanti, eguale al numero di atomi del corpo che erano stati eccitati. È questo il meccanismo dell'emissione di qualsiasi forma di energia raggiante, sia essa calore, luce, raggi X.... Nella meccanica dei quanti si considera dunque ogni tipo di radiazione di determinata frequenza come l'insieme di un gran numero di quanti, tutti eguali fra loro, cioè aventi la stessa energia. Così per esempio un raggio di luce rossa è costituita da un enorme numero di quanti eguali, ossia aventi tutti la stessa energia, che corrisponde alla frequenza di $4{,}3 \times 10^{14}$ vibrazioni al secondo. Da questo punto di vista ogni radiazione elettromagnetica diventa molto simile ad una radiazione corpuscolare: questa è costituita da tanti corpuscoli, quella da enti determinati di energia. Per questa ragione i quanti prendono anche il nome di « granuli di energia », nome che sottilinea l'analogia tra un corpuscolo e un quanto.

Questa analogia tra i fenomeni corpuscolari e

quelli ondulatori, viene notevolmente precisata nella meccanica quantistica, l'odierna teoria che rappresenta un ulteriore sviluppo dei concetti fondamentali della teoria di BOHR-SOMMERFELD; in essa gli elettroni, che sono stati sempre considerati come corpuscoli, sono analoghi, a molti effetti, a gruppetti di onde, e i quanti di luce, che sono, come abbiamo visto, radiazioni elettromagnetiche, si comportano in molti fenomeni come corpuscoli. Il più bel successo sperimentale di queste vedute si ebbe dalle brillanti esperienze di DAVISSON e GERMER, i quali poterono provare che un fascio di elettroni subisce fenomeni del tutto analoghi a quelli di un fascio di radiazioni elettromagnetiche. Non vogliamo qui soffermarci ad esporre i fondamenti della meccanica quantistica, la quale permette, almeno nei casi in cui si riesca a superare le difficoltà matematiche del calcolo effettivo, di rendere ragione, in modo praticamente perfetto, di tutto il complesso del comportamento atomico; ancora oggi però il modello atomico di BOHR-SOMMERFELD è considerato come una sufficiente approssimazione della realtà, la quale fornisce interpretazioni molto approssimate di vaste categorie di fenomeni, e permette di prevedere moltissime proprietà degli atomi, dando in certi casi risultati esattamente conformi alla esperienza, e in altri casi una buona approssimazione.

***

Gli atomi chimicamente distinti che si trovano nelle successive caselle della tavola di MENDELEJEW, differiscono l'uno dall'altro per la diversa carica del nucleo e perciò per il diverso numero di elettroni satelliti: se quindi esistono in natura due atomi i quali hanno lo stesso numero di elettroni ma peso diverso, essi hanno le stesse proprietà chimiche e occupano la stessa casella; e per questa ragione si dicono « isotopi » (dal greco *ἴσος τόπος* = egual posto). Per esempio esiste un elemento i cui atomi sono costituiti da un nucleo centrale, di massa leggermente diversa da quella del protone, e da un solo elettrone satellite; esso è un isotopo dell'idrogeno, e prende il nome di « deuterio »: il suo nucleo si dice « deutone ».

L'analisi chimica ci permette solo di riconoscere se tutti gli atomi di una stessa sostanza contengano lo stesso numero di elettroni, ma non ci fornisce alcuna indicazione sulla uguaglianza o meno delle loro masse. Chimicamente quindi si possono distinguere 92 elementi; ma in realtà, se si tien conto anche delle differenze di massa, le specie di atomi esistenti in natura sono assai più numerose (circa 240). Alcuni di essi, pur avendo lo stesso numero di elettroni esterni, ed essendo quindi chimicamente indistinguibili, si differenziano per il diverso valore della loro massa, e sono perciò

isotopi. Per fare un'analisi che permetta di stabilire di quanti isotopi sia costituito un dato elemento, cioè quante specie di atomi esistano che, pur avendo lo stesso numero di elettroni, si distinguano per la loro diversa massa, si ricorre allo spettrografo di massa di ASTON. Prima di passare a descrivere questo apparecchio facciamo una breve premessa di ordine generale.

Come abbiamo visto, fornendo energia ad un atomo, si può portare uno dei suoi elettroni esterni a ruotare su di un'altra orbita, la quale sarà tanto più lontana dal nucleo, quanto maggiore è l'energia che si fornisce. Per un valore abbastanza grande di questa si può addirittura riuscire a portare l'elettrone fuori dall'atomo, il quale resterà perciò con una carica positiva, di valore uguale a quella dell'elettrone. L'atomo così mutilato prende il nome di ione; questo è dunque il meccanismo della ionizzazione a cui avevamo accennato parlando del modo di misurare l'attività di una sostanza radioattiva. Se lo ione riesce a ricuperare un elettrone, la carica negativa di questo e quella positiva dello ione si equilibreranno, e si riformerà un atomo complessivamente neutro.

Ciò premesso vediamo su quale principio è basato lo spettrografo di massa di ASTON (fig. 8 e tav. IV). Supponiamo di far passare un fascetto di atomi ionizzati di un certo elemento, dotati tutti della stessa velocità, tra i due poli di una calamita; l'effetto della calamita è di deviare gli ioni

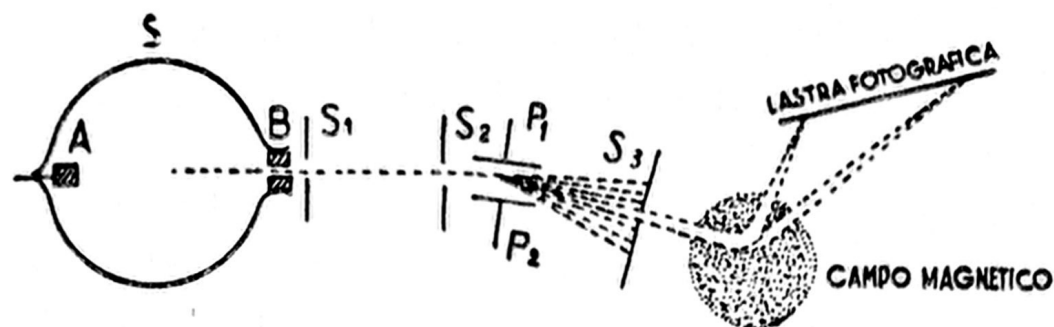



Fig. 8. — Schema dello spettrografo di massa di Aston. S, Recipiente in cui l'elemento in esame, allo stato gassoso, viene ionizzato mediante la scarica fra i due elettrodi A e B — S_1 S_2 S_3 schermi per delimitare il pennello di ioni — P_1 P_2 piastre metalliche fra le quali si stabilisce un campo elettrico.

dalla loro traiettoria, e di deviarli tanto più quanto più sono leggeri. Se gli ioni avessero tutti lo stesso peso, sarebbero deviati tutti ugualmente dalla calamita; supponiamo invece, per esempio, che l'elemento considerato sia costituito da una miscela di due isotopi, cioè da due tipi di atomi, che hanno peso diverso, pur avendo lo stesso numero di elettroni esterni. Poichè gli atomi, perdendo un elettrone, hanno subito soltanto una variazione della loro carica, senza che la loro massa sia mutata, anche gli ioni saranno di due tipi di diverso peso; la calamita quindi produce una separazione dei due tipi di ioni, poichè devia maggiormente quelli di peso minore, in modo che, ponendo una lastra fotografica in posizione opportuna, troveremo su questa due tracce distinte, dovute ai due fasci di ioni, gli uni più pesanti e gli altri più leggeri. Dalla posizione delle due macchioline sulla lastra fotografica si può risalire al peso dei due isotopi dell'elemento considerato.

Questo metodo si può naturalmente applicare qualunque sia il numero di isotopi di cui è costituito l'elemento che si studia. Osservando con lo spettrografo di massa quasi tutti gli elementi esistenti in natura, si è riconosciuto che moltissimi di essi sono costituiti da un miscuglio di isotopi, il cui numero può variare, secondo i diversi elementi, da due a circa una dozzina. E la scoperta degli isotopi ha dato luogo ad una fondamentale considerazione che, come vedremo, costituisce una delle basi su cui si è eretta la moderna teoria del nucleo atomico.

Nella misura dei pesi atomici degli elementi si prende come unità il peso del più leggero di essi, cioè dell'atomo di idrogeno: quando perciò si dice per esempio che il cloro pesa 35,45, vuol dire che esso pesa 35,45 volte più di un atomo di idrogeno. I pesi atomici, così definiti, dei 92 elementi della tabella di Mendelejew non sono, salvo qualche rara eccezione, numeri interi; quindi, con grande disappunto di quasi tutti gli scienziati da Mendelejew in poi, non si poteva in alcun modo tentare la costruzione di una teoria, che sarebbe stata in verità molto allettante, secondo la quale i diversi elementi sarebbero costituiti da aggregati, in vario numero, di uno solo o, comunque, di pochi tipi di particelle. Ebbene la speranza, ormai tramontata, di poter costruire una tale teoria, risorse e si affermò non appena si vide che, mentre gli atomi

dei 92 elementi avevano pesi che non erano rappresentati da numeri interi, (sempre prendendo come unità di misura il peso di un atomo di idrogeno) i pesi dei 240 isotopi noti erano rappresentati t u t t i da numeri interi. Consideriamo per il momento l'esempio del cloro: questo elemento è costituito da una miscela di due isotopi, di peso atomico rispettivamente 35 e 37; però mentre il primo è contenuto, nella miscela dei due isotopi che costituisce il cloro, nella percentuale di 75,5%, il secondo è contenuto per il 22,5%; in modo che in definitiva il peso atomico del cloro è 35,45. E analogamente avviene per i vari elementi, alla cui formazione concorrono gli isotopi in diversa percentuale.

In seguito alla scoperta degli isotopi si ordinarono tutte le varie specie di atomi in una tabella nella quale si tiene conto, non solo della loro carica, ma anche del peso atomico; e da varie considerazioni, completamente giustificate da questa tabella, si potè giungere, come vedremo in seguito, alla costruzione di un modello nucleare.

Capitolo IV

LE TRASFORMAZIONI RADIOATTIVE

Le idee che abbiamo esposto nel precedente capitolo sulla costituzione dell'atomo ci aiuteranno a comprendere la natura delle trasformazioni che avvengono spontaneamente nelle sostanze radioattive. Mentre dunque finora avevamo potuto soltanto esaminare le radiazioni emesse vogliamo ora passare allo studio delle modificazioni che subiscono le sostanze stesse.

Gli atomi dei vari elementi sono in genere s t a b i l i: cioè essi non hanno tendenza a trasformarsi gli uni negli altri; prendiamo ad esempio un atomo di idrogeno, costituito da un nucleo con carica positiva $+1$ e da un elettrone che ruota attorno ad esso e che porta una carica negativa -1; questo insieme del nucleo e dell'elettrone è stabile. Ciò non vuol dire che in determinate circostanze l'atomo di idrogeno non possa perdere il suo elettrone; se tuttavia un agente esterno riesce a strappare l'elettrone dall'atomo di idrogeno, il nucleo, che resta inalterato, tende a cat-

turare un altro elettrone per riformare l'atomo neutro di idrogeno. L'elettrone esterno è così cambiato, ma poichè il nucleo dell'idrogeno non può venir modificato nè spontaneamente nè per cause esterne, e poichè d'altra parte le proprietà degli atomi risiedono solo nel loro nucleo, ogni atomo di idrogeno può considerarsi invariato. E così può dirsi degli atomi della maggior parte degli elementi: essi possono in alcuni casi, perdere o acquistare uno o più elettroni; la loro parte essenziale però, cioè il loro nucleo, resta invariato e se noi potessimo, a parte le difficoltà pratiche, seguire la storia dell'atomo attraverso i secoli, troveremmo che il suo nucleo ha conservato sempre la sua individualità. (Incontreremo in seguito alcune eccezioni all'invariabilità dei nuclei stabili, le quali però possono per il momento trascurarsi).

Gli atomi invece delle sostanze radioattive non sono stabili; essi possono conservare la loro primitiva costituzione a volte anche per secoli o millenni. A un certo punto però un atomo esplode e il suo nucleo spara, per così dire, un proiettile, il quale può essere una particella *alfa* o una particella *beta*. Le particelle *beta* non sono altro che elettroni, come abbiamo più volte ripetuto; si potrebbe quindi pensare che quando un atomo radioattivo emette una particella *beta* il suo nucleo resti inalterato, e venga sparato uno degli elettroni planetari. Avvertiamo invece fin d'ora

che le trasformazioni radioattive sono tutte nucleari: sono i nuclei degli atomi che esplodendo emettono le particelle *alfa* e *beta*.

Questa esplosione è accompagnata spesso dall'emissione di energia sotto forma di raggi *gamma*. In modo un po' grossolano possiamo raffigurarci l'emissione di una particella a questo modo: paragoniamo l'atomo radioattivo a un fucile carico e la particella espulsa dall'atomo al proiettile che si trova nella canna del fucile. Quando facciamo scattare il cane il proiettile parte, e contemporaneamente esso e la canna del fucile si scaldano e irraggiano calore all'intorno. Il calore che si produce quando si spara il fucile corrisponde all'emissione di raggi *gamma*.

Questo esempio, ripetiamo, è molto grossolano e inesatto: nell'atomo radioattivo non esiste una parte che resti inalterata e che corrisponderebbe al fucile, il quale non si modifica sparando il proiettile. Dobbiamo piuttosto immaginare che il nucleo, nel quale è contenuta una enorme quantità di energia, si disgreghi completamente in tanti frantumi. Uno di questi viene cacciato via e i rimanenti si riorganizzano per formare un nuovo nucleo diverso dal precedente. A volte nel riorganizzarsi il nucleo residuo si trova dell'energia in più di cui non sa cosa farsi e che emette in forma di raggi *gamma*.

Per renderci conto del come resti modificato un atomo dopo l'espulsione di una particella, dob-

biamo distinguere due casi, secondo che il corpuscolo emesso è una particella *alfa* o una particella *beta*. Una prima differenza, la più materiale in un certo senso, tra le particelle *alfa* e *beta* sta nel loro peso: le particelle *beta* sono infatti elettroni, i quali hanno massa tanto piccola rispetto a quella dell'atomo, da potersi praticamente trascurare; dunque l'emissione di una particella *beta* non modifica il peso dell'atomo. Le particelle *alfa* sono invece nuclei di elio, come dimostrò l'esperienza di RUTHERFORD e ROYDS, illustrata nel capitolo II. La loro carica elettrica e la loro massa sono state misurate e si è trovato così che esse corrispondono appunto alla carica e alla massa del nucleo di elio: precisamente la massa di una particella *alfa* è uguale a quattro volte la massa di un atomo di idrogeno, e poichè questa è stata scelta come massa unitaria, possiamo dire senz'altro che una particella *alfa* ha massa 4. Ne segue che per l'emissione di una particella *alfa* la massa dell'atomo radioattivo diminuisce di 4 unità.

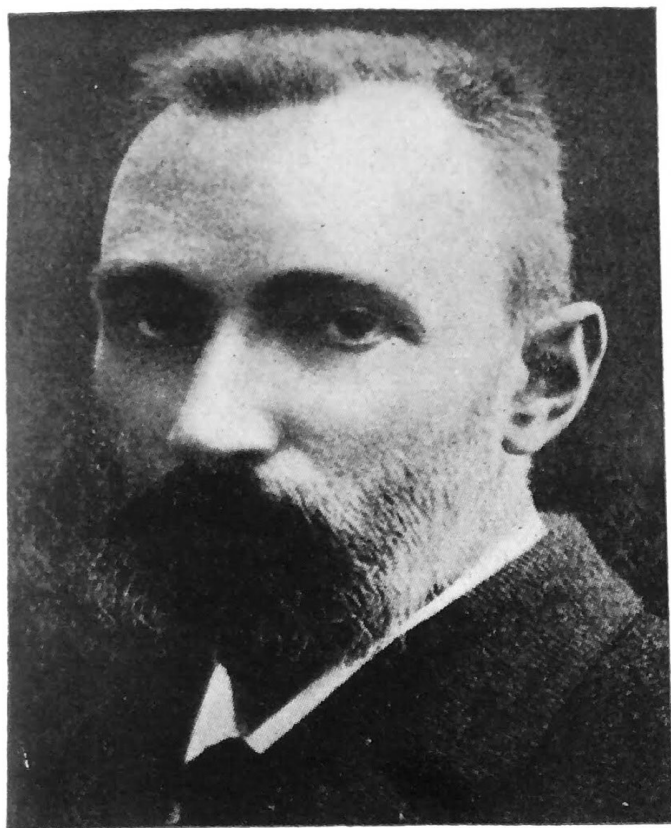
Più importanti delle variazioni di massa sono le variazioni di carica. È noto infatti che le proprietà chimiche e fisiche di un atomo sono determinate dalla carica del nucleo; in corrispondenza di una variazione di carica dovremo quindi aspettarci una modificazione di proprietà dell'atomo. Distinguiamo di nuovo due casi, a seconda che la particella emessa sia *alfa* o *beta*, poichè la prima ha carica positiva $+2$, mentre

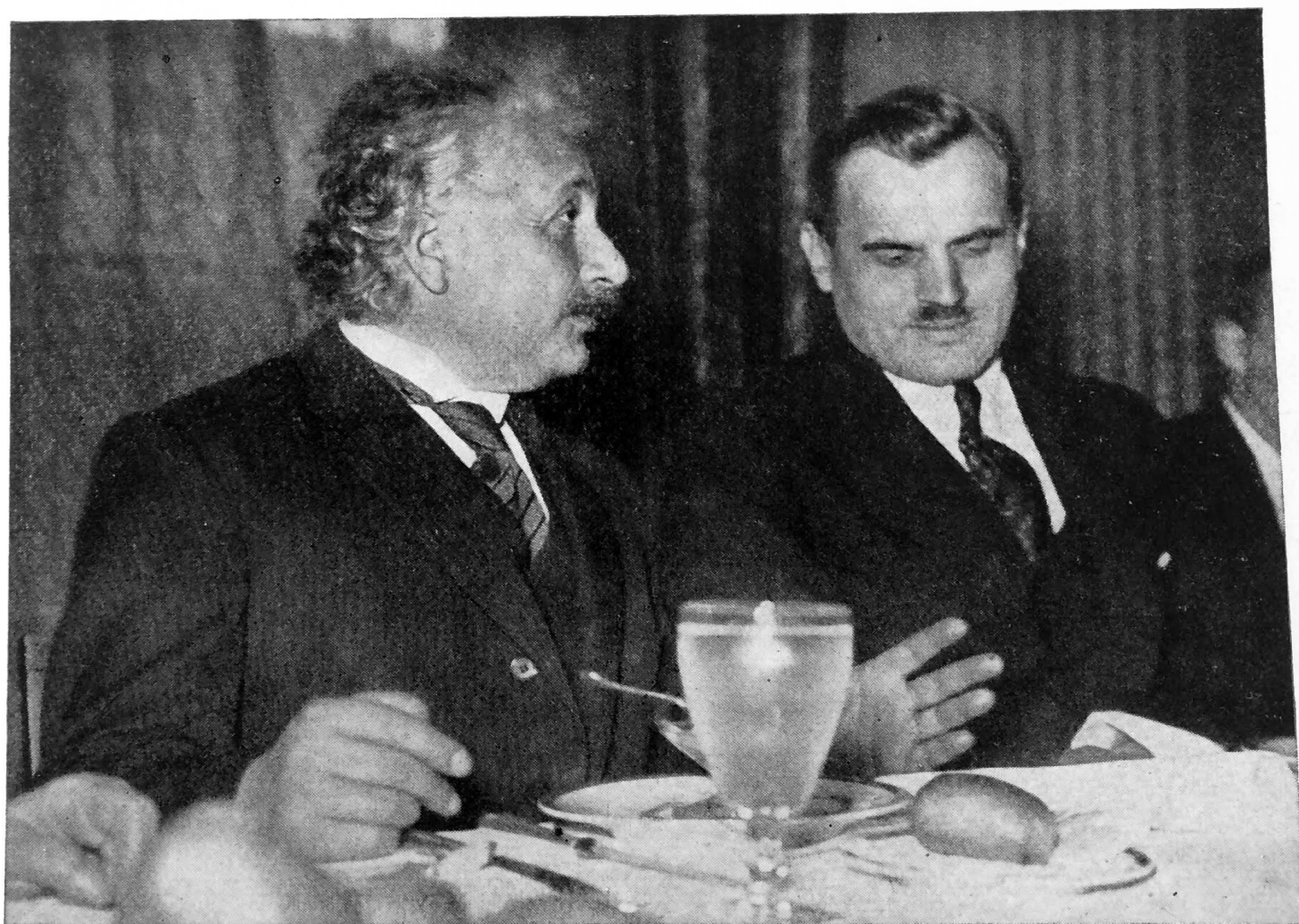
un elettrone ha carica — 1. Quando dunque un nucleo radioattivo emette un elettrone, perde una carica — 1, cioè la sua carica cresce di un'unità; quando invece un nucleo emette una particella *alfa*, la sua carica diminuisce di 2 unità. Dunque « se un nucleo radioattivo emette una particella *alfa*, il suo peso diminuisce di 4 e la sua carica di 2; se esso emette una particella *beta*, il suo peso resta invariato e la sua carica cresce di 1 ».

Sappiamo che gli elementi, nel sistema periodico, sono ordinati per carica nucleare crescente, e il numero d'ordine di ogni casella coincide con la carica nucleare dell'elemento che la occupa. Dunque perdita di due cariche positive significa spostamento di due posti nel sistema periodico verso le caselle di numero d'ordine inferiore; perdita di una carica negativa corrisponde invece a spostamento di un posto verso le caselle di numero d'ordine superiore.

Vogliamo ora esaminare un caso pratico e vedere, per esempio, come avvenga la disintegrazione del radio (di simbolo *Ra*). Questo elemento, che è un metallo alcalino terroso, ha peso atomico 226 e carica 88; i suoi atomi non sono stabili, ma hanno una certa probabilità di emettere una particella *alfa*, probabilità che vedremo in seguito come debba intendersi e come possa calcolarsi. Per semplificare le cose supporremo di potere scegliere per le nostre osservazioni un solo atomo il quale stia per disintegrarsi. Questo emette al-

lora una particella *alfa* e perde in conseguenza due cariche positive. L'atomo che si forma dopo la riorganizzazione del nucleo rimasto, deve avere peso atomico di 4 unità inferiore a quello del radio e nel sistema periodico degli elementi deve trovarsi spostato di due posti nel verso dei numeri atomici decrescenti. Poichè il radio ha carica 88, un suo atomo disintegrandosi deve passare alla casella 86, la quale si trova nella colonna dei gas nobili (V. sistema periodico). Si trova infatti che l'atomo di radio, conformemente a quanto ci si deve aspettare da queste considerazioni teoriche, si trasforma in un atomo di emanazione di radio o radon (simbolo *Em*), che è il più pesante dei gas nobili. Il solo fatto che l'emanazione è gassosa, ci mostra che essa ha proprietà molto diverse da quelle del radio.

Nemmeno gli atomi dell'emanazione sono stabili, ma anch'essi hanno una certa probabilità di disintegrarsi, emettendo anche in questo caso una particella *alfa*; un atomo di emanazione per la perdita di una particella *alfa* si trasforma in un atomo di un elemento che prende il nome di radio *A* (*Ra A*) il quale ha peso atomico $222 - 4 = 218$ e carica $86 - 2 = 84$; esso è dunque un isotopo del polonio. L'atomo di radio *A* è ancora instabile e può emettere un'altra particella *alfa* per trasformarsi in un atomo di radio *B* (*Ra B*), di peso atomico 214 e di carica nucleare 82 (isotopo del piombo). Il radio *B* può ancora trasformarsi,

Pierre Curie

Marie Curie

Albert Einstein Arthur H. Compton

però un suo atomo non emette più una particella *alfa*, ma una *beta*. In questo caso dunque dobbiamo aspettarci che l'atomo trasformato conservi il peso dell'atomo di radio *B*, e che la sua carica non diminuisca ulteriormente, come per l'emissione di una particella *alfa*, ma bensì aumenti di una unità, riportando l'atomo di un posto verso destra. Infatti un atomo di radio *B* si trasforma in un atomo di r a d i o *C* (*Ra C*), che ha peso atomico 214, occupa la casella 83 ed è quindi un isotopo del bismuto. L'atomo di radio *C* a sua volta perde una particella *beta* per dar luogo a un atomo di r a d i o *C'*, che quindi ha ancora peso atomico 214, come quello dell'atomo di radio *A*, ed è spostato di un altro posto verso sinistra.

Non vogliamo qui seguire le ulteriori trasformazioni che portano dall'atomo di radio instabile a un atomo stabile, che, come vedremo in seguito, è un atomo di piombo. Riassumiamo invece le trasformazioni dal radio al radio *C'* nel seguente specchietto.

Sono qui rappresentati gli spostamenti successivi di carica e di peso dovuti all'emissione di una particella *alfa* o *beta*. Appare subito, dall'osservazione dello specchietto, che il radio C' e il radio A hanno tutti e due la carica 84 e sono quindi isotopi; i loro pesi atomici differiscono di 4 unità. Questo fatto era da prevedersi, poichè il passaggio da radio A a radio C' avviene attraverso l'emissione successiva di una particella *alfa* e di due *beta*; poichè solo la perdita di particelle *alfa* altera il peso dell'atomo, questo è diminuito delle 4 unità corrispondenti al peso della particella *alfa* emessa; la carica invece in un primo tempo è diminuita di 2, (emissione *alfa*), poi, per l'emissione di 2 successivi elettroni, è riaumentata di 2, cioè è ritornata eguale alla carica del radio A.

Dunque, « quando un atomo radioattivo emette successivamente una particella *alfa* e due *beta*, la carica resta invariata e il peso diminuisce di 4 », ossia si ha la formazione di un isotopo.

Se le nostre conoscenze dovessero rimanere limitate al comportamento di un solo atomo di sostanza radioattiva, esse non avrebbero naturalmente nessuna importanza pratica e sarebbe stata fatica sprecata l'averle esposte; fortunatamente è oggi possibile il tener conto del comportamento complessivo di tutti gli atomi di una sostanza radioattiva.

Prima però di passare a esporre l'andamento generale delle trasformazioni radioattive, vogliamo impratichire il lettore con la terminologia, che è particolarmente facile perchè deriva da un continuo parallelismo tra le trasformazioni radioattive e lo svolgimento della vita umana. Abbiamo visto che le sostanze radioattive si generano le une dalle altre; così l'emanazione si genera dal radio, e il radio *A* dall'emanazione ecc... Ebbene, la formazione di un atomo di emanazione è considerata come la morte di un atomo di radio e la nascita di uno di emanazione; si dice che il radio è la sostanza madre dell'emanazione. Come per il caso degli uomini si chiama vita di un atomo il tempo che trascorre tra la sua nascita e la sua morte; dunque la vita di un atomo di emanazione è l'intervallo di tempo che trascorre tra la sua formazione da un atomo di radio e la sua disintegrazione per dar luogo a un atomo di radio *A*. Il paragone può spingersi più oltre, poichè le sostanze radioattive, a somiglianza degli uomini, sono organizzate in famiglie, in genere molto semplici: c'è una sostanza capostipite, non generata da altre sostanze radioattive, o che per lo meno si può considerare figlia di ignoti, dalla quale, per trasformazioni successive si formano tutte le altre sostanze figlie. Vi sono alcuni casi in cui la sostanza madre ha due figli, con formazione conseguente di sostanze che si possono considerare sorelle. Uno di questi casi avviene nella

disintegrazione del radio *C*: la maggior parte di questo emette delle particelle *beta* trasformandosi in radio *C'*; ma una piccola parte invece emette particelle *alfa* e si trasforma in radio *C''* dando luogo ad un ramo secondario della famiglia che subito però si riunisce al ramo principale. Questo prosegue per successive trasformazioni *alfa* e *beta* fino ad arrivare al radio *G*, isotopo del piombo, che è stabile e non si trasforma ulteriormente. (vedi specchietto pag. seg.)

Si conoscono tre famiglie radioattive: la famiglia dell'uranio, quella dell'attinio e quella del torio. La famiglia dell'uranio è quella che conta il maggior numero di componenti: ad essa appartengono, oltre al capostipite che è l'uranio, e ad altri membri (uranio X_1, uranio X_2, uranio II, ecc....) anche lo ionio, il radio, l'emanazione di radio, che è gassosa, a differenza di tutti gli altri membri della famiglia.

Anche ciascuna delle due famiglie del torio e dell'attinio possiede un componente gassoso, che prende il nome rispettivamente di emanazione di torio o toron, e di emanazione di attinio o attinon. È interessante notare che le tre emanazioni sono isotope, poichè hanno tutte e tre la stessa carica. Il loro peso atomico dipende dal tipo di trasformazioni (*alfa* o *beta*) che i loro progenitori hanno subito e dalla massa del capostipite, come può vedersi nello specchietto. I prodotti stabili finali di tutte e tre le famiglie radioattive sono isotopi

FORMAZIONE DELLA FAMIGLIA DELL'URANIO

Elemento e simbolo		Tempo di riduzione a metà
Uranio primo	UI	$4{,}5 \times 10^9$ anni
	↓ α	
Uranio X_1	UX_1	24,5 giorni
	↓ β	
Uranio X_2	UX_2	1,14 minuti
	↓ β	
Uranio secondo	UII	10^6 anni
	↓ α	
Ionio	Io	$7{,}6 \times 10^4$ anni
	↓ α	
Radio	Ra	1600 anni
	↓ α	
Emanazione di radio o radon............	Em	3,82 giorni
	↓ α	
Radio A	RaA	3 minuti
	↓ α	
Radio B	RaB	27 minuti
	↓ β	
Radio C	RaC	20 minuti
	β ↙ ↘ α	
Radio C′ e Radio C″ ..	RaC′ RaC″	10^{-6} secondi 1,32 minuti
	α ↘ ↙ β	
Radio D	RaD	25 anni
	↓ β	
Radio E	RaE	5 giorni
	↓ β	
Radio F o Polonio....	RaF(Po)	136 giorni
	↓ α	
Radio G	RaG	stabile

FORMAZIONE DELLA FAMIGLIA DELL'ATTINIO

Elemento e simbolo		Tempo di riduzione a metà
Protoattinio	Pa	$1,25 \times 10^4$ anni
	↓ α	
Attinio	Ac	13,4 anni
	↓ β	
Radioattinio	RaAc	19 giorni
	↓ α	
Attinio X.............	AcX	11 giorni
	↓ α	
Emanazione di attinio o attinon	An	4 secondi
	↓ α	
Attinio A............	AcA	2×10^{-3} secondi
	↓ α	
Attinio B.............	AcB	36 minuti
	↓ β	
Attinio C............	AcC	2 minuti
	β ↙ ↘ α	
Attinio C′ e Attinio C″	AcC′ AcC″	5 minuti (AcC″)
	α ↘ ↙ β	
Attinio D............	AcD	stabile

FORMAZIONE DELLA FAMIGLIA DEL TORIO

Elemento e simbolo		Tempo di riduzione a metà
Torio	Th	$1,65 \times 10^{10}$ anni
	↓ α	
Mesotorio 1	$MsTh_1$	7 anni
	↓ β	
Mesotorio 2	$MsTh_2$	6 ore
	↓ β	
Radiotorio	RaTh	2 anni
	↓ α	
Torio X	ThX	3,65 giorni
	↓ α	
Emanazione di torio o Toron	Tn	54 secondi
	↓ α	
Torio A	ThA	0,15 secondi
	↓ α	
Torio B	ThB	10,6 ore
	↓ β	
Torio C	ThC	60 minuti
	β ↙ ↘ α	
Torio C′ e Torio C″ . .	ThC′ ThC″	3 minuti (ThC″)
	α ↘ ↙ β	
Torio D	ThD	stabile

del piombo; i pesi atomici però delle tre specie di piombo così formate sono diversi tra loro e diversi anche dal peso atomico del piombo comune.

***

Per spiegare le modalità con cui avviene la disintegrazione di una sostanza radioattiva bisogna tener presente un'ipotesi fondamentale, avanzata da RUTHERFORD e SODDY, e in seguito provata esatta dall'esperienza; secondo questa ipotesi «il numero di atomi che si disintegrano in un determinato istante è proporzionale al numero totale di atomi presenti». Questo enunciato ci riuscirà più chiaro se sostituiamo alla parola atomo la parola uomo e al verbo disintegrare il verbo morire. L'ipotesi di RUTHERFORD e SODDY direbbe allora che il numero di persone che muoiono ad un dato momento è proporzionale al numero di persone che esistono in quel momento. È evidente che il numero di persone che muoiono in un anno a Roma, da che questa conta un milione di abitanti, sarà doppio del numero di persone che morivano in un anno a Roma quando la sua popolazione ammontava soltanto a mezzo milione.

Per verificare l'ipotesi di RUTHERFORD e SODDY per il caso delle sostanze radioattive bisogna prima misurare le quantità di sostanza con sufficiente esattezza per potere ritenere che in quantità eguali

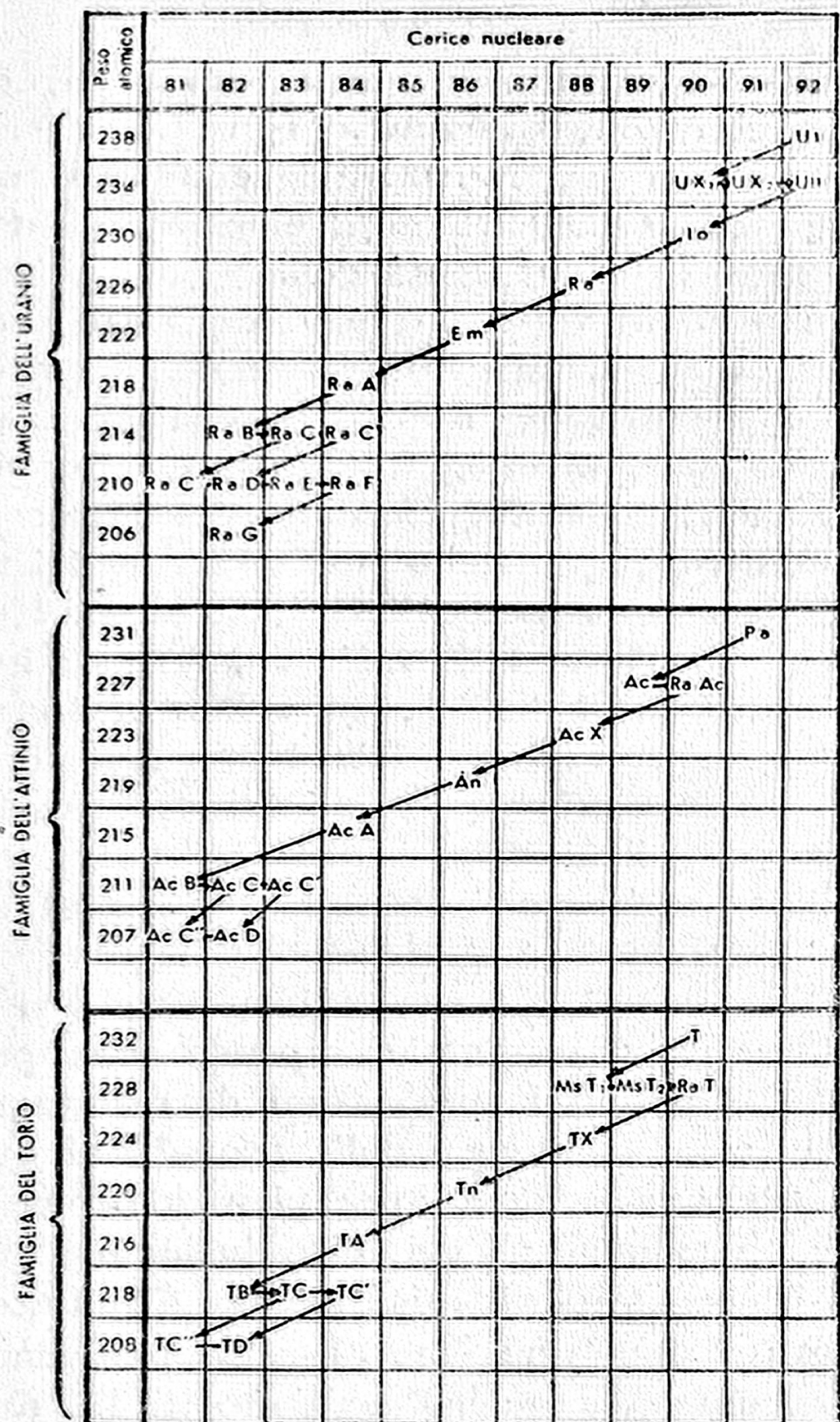



Fig. 9. – Sostanze radioattive.

Ogni freccia indica una trasformazione radioattiva: una freccia orizzontale indica emissione di un elettrone; una freccia obliqua, emissione di una particella α. Gli elementi nella stessa colonna verticale sono isotopi.

di essa sia contenuto un ugual numero di atomi. Conteremo allora, per esempio, con uno dei metodi per individuare le radiazioni e che illustreremo in seguito, le particelle *alfa* emesse da due tubetti di vetro contenenti della emanazione, di cui l'uno abbia volume doppio dell'altro; vedremo allora che il tubetto più grande emette un numero di particelle doppio, cioè il numero di atomi che si è disintegrato in esso è doppio di quello che si è disintegrato nel tubetto piccolo.

Il numero di particelle emesse ad ogni istante da una sostanza radioattiva o, come suol dirsi, la sua attività, varia col tempo; infatti man mano che i suoi atomi vanno trasformandosi, diminuisce la quantità di sostanza non ancora trasformata e quindi diminuisce anche il numero di atomi che si disintegrano. Dunque «l'attività delle sostanze radioattive decade col tempo».

La quantità di sostanza radioattiva che si trasforma in un dato tempo, dipende dalla probabilità che hanno i suoi atomi di disintegrarsi. Per chi conosca le leggi della probabilità questo fatto è di per sè evidente; per spiegarlo invece a chi non conosca queste leggi, introduciamo a questo punto il concetto di «vita media» di un atomo; a questo scopo torneremo al solito paragone tra la vita umana e quella degli atomi. La durata della vita di un uomo può variare da 0 anni fino a oltre 100 anni: vi sono infatti individui che muo-

iono al momento stesso della nascita e altri invece che possono arrivare a sorpassare i 100 anni; la durata effettiva della vita umana dipende poi da circostanze casuali e può assumere tutti i possibili valori intermedi fra questi due limiti estremi. Sarebbe quindi impossibile prevedere l'età a cui deve morire un singolo individuo; tuttavia, se consideriamo un gruppo sufficientemente grande di persone, potremo indicare la durata più probabile della loro vita, cioè la *vita media*; questa non viene valutata intuitivamente, ma con precise regole matematiche. Per esempio la vita media degli italiani viene calcolata negli uffici di statistica: si considerano tutte le persone che muoiono in Italia in un determinato intervallo di tempo, per esempio in un anno; si sommano le età a cui queste persone sono morte, e si divide la somma per il numero dei morti.

Nel caso degli atomi le cose vanno in maniera analoga: la durata della loro vita può variare bensì fra limiti molto più estesi che non la vita umana e cioè fra 0 e infinito, e solo il caso decide quale valore, fra tutti quelli possibili entro questi due limiti, assumerà poi effettivamente la durata della vita di un determinato atomo; tuttavia si può anche per gli atomi radioattivi indicare qual'è la durata più probabile della loro vita, e cioè qual'è la loro vita media. Questa è la stessa per tutti gli atomi della stessa specie, mentre può variare moltissimo per atomi appartenenti a

sostanze radioattive diverse, come del resto varia anche moltissimo la vita media per le diverse specie viventi. Per esempio la vita media degli atomi di radio è, come preciseremo meglio in seguito, enormemente più grande della vita media degli atomi di emanazione. Ciò vuol dire che in massa una certa quantità di radio impiegherà, per trasformarsi in emanazione, un tempo molto più grande che non l'emanazione a trasformarsi in radio *A*. Questo però non esclude che fra due atomi scelti a caso, uno di radio e uno di emanazione, non possa vivere più a lungo quello di emanazione; allo stesso modo come tra due individui presi a caso, uno in una popolazione più longeva, l'altro in una popolazione meno longeva può darsi che viva più a lungo l'individuo scelto nella popolazione meno longeva.

Quanto si è detto finora sulla vita media può riassumersi così: tutti gli atomi di una stessa sostanza radioattiva hanno la stessa probabilità di disintegrarsi, corrispondente alla loro vita media; la durata effettiva della vita di ogni atomo è però un fenomeno casuale; esso non dipende da fattori esterni come la pressione, la temperatura, lo stato di combinazione chimica ecc., poichè è il caso che decide se un atomo si disintegrerà appena formato o dopo dei secoli o dei millenni.

Allora, si potrà forse domandare qualcuno, se la disintegrazione degli atomi è casuale, come va che noi osserviamo una emissione continua di

radiazioni? Non sarebbe da aspettarsi che in qualche momento venisse sparato un numero enorme di particelle e in altri momenti nessuno? Le leggi statistiche rispondono a questa domanda, come già avevano risposto a una domanda analoga nel caso della teoria cinetica dei gas. Quando si osserva in individui diversi uno stesso fenomeno soggetto a leggi casuali, si trovano delle fluttuazioni molto grandi da un individuo a un altro; studiando invece il comportamento complessivo di un numero molto grande di individui le diversità si attenuano e il fenomeno appare tanto più uniforme, quanto più grande è il numero di individui osservati. Così, tornando al solito esempio della vita umana, potremo voler studiare il fenomeno della nascita degli uomini e osservare come le nascite siano distribuite nel tempo. Se noi scegliamo per le nostre osservazioni un piccolo gruppo di persone, per esempio un villaggio di un migliaio di abitanti, troveremo che in esso le nascite avvengono senza regolarità: potrà darsi che per un mese e anche due non nasca nessuno, e che poi arrivino quasi contemporaneamente alcuni nuovi marmocchi. Se invece passiamo a osservare gli abitanti di una città grande, per esempio di Roma, vedremo che tutti i giorni nasce un certo numero di bambini; questo numero potrà variare, ma già tra limiti molto più ristretti: non si darà il caso che un giorno non nasca nessuno e un giorno nascano invece mille persone. In ge-

nere il numero dei nati a Roma per ogni giorno potrà oscillare fra 50 e 100. Se poi consideriamo tutta l'umanità, vediamo che ogni minuto, anzi ogni secondo, nasce qualcuno e quindi, nel comportamento complessivo di tutta l'umanità, la nascita è un fenomeno continuo.

Così avviene per le sostanze radioattive: se noi potessimo osservare un piccolo numero di atomi, vedremmo certamente degli sbalzi nella loro disintegrazione. Siccome però le quantità di sostanze radioattive che si usano praticamente nei laboratori, pur essendo spesso assai piccole, contengono un numero enorme di atomi, il fenomeno della loro disintegrazione, e quindi della nascita di radiazioni e di nuove sostanze, ci appare continuo.

Accanto alla vita media di una sostanza radioattiva si suole considerare il «tempo in cui essa si riduce a metà» (periodo). Le due grandezze sono matematicamente legate tra loro poichè la vita media di una sostanza si ottiene moltiplicando per 1,45 il tempo in cui essa si riduce a metà; quando questo non sia nè troppo lungo nè troppo breve può essere misurato direttamente.

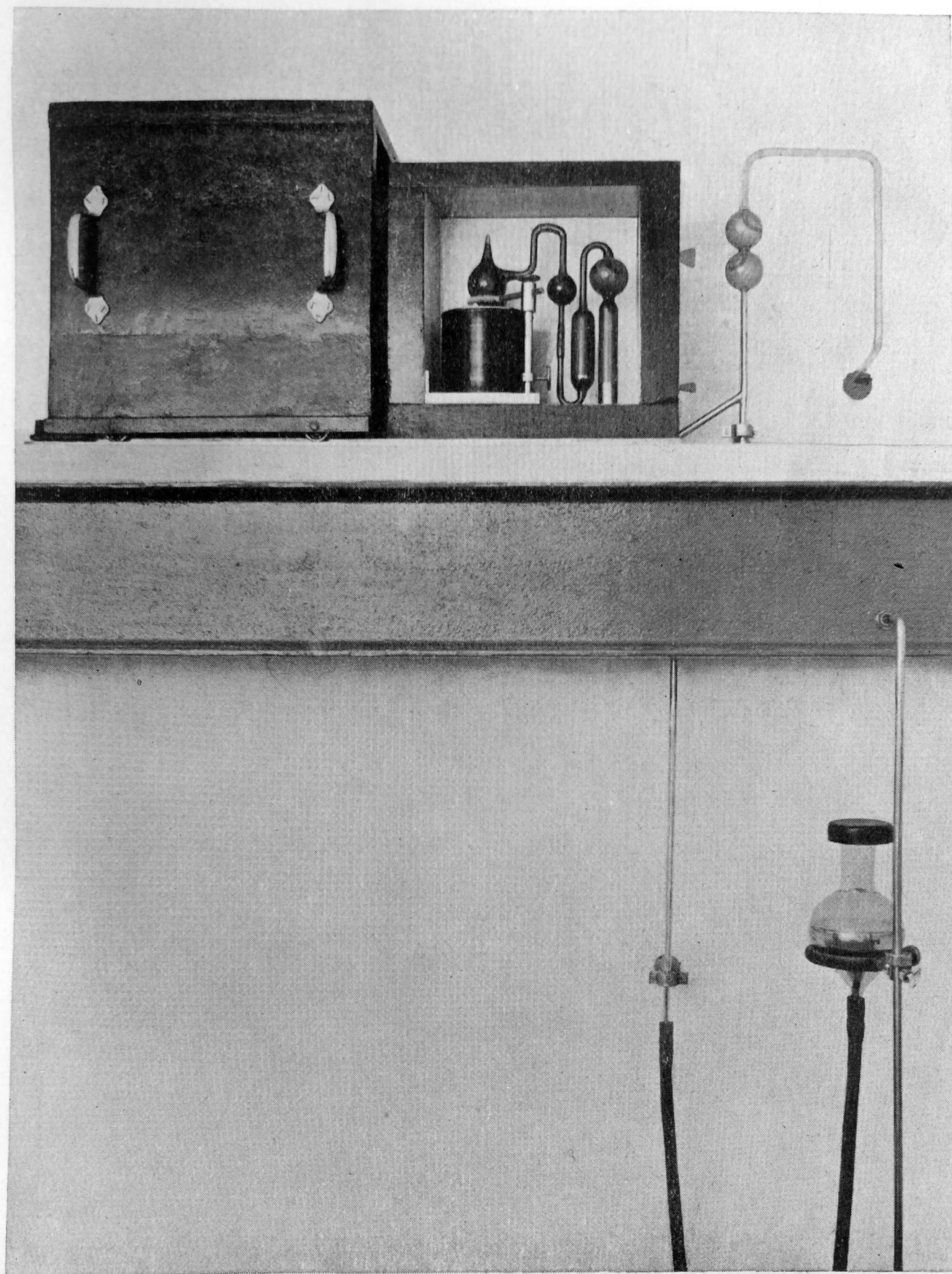
Negli specchietti (pagg. 69, 70, 71) delle famiglie radioattive sono indicati i valori del tempo di riduzione a metà per tutte le sostanze; notiamo che i capostipiti delle tre famiglie sono tutti caratterizzati da un tempo di riduzione a metà lunghissimo, confrontabile come ordine di grandezza

con l'età della terra. Questo fatto ci spiega come mai le sostanze radioattive esistano ancora; se l'uranio durasse in vita pochi anni, esso sarebbe ormai completamente scomparso e con lui sarebbero scomparsi tutti i membri della sua famiglia. Esso invece si decompone lentissimamente rigenerando in continuazione tutta la serie dei suoi successori, e così pure lentissimamente si decompongono il torio e il protoattinio.

Abbiamo visto che ogni sostanza radioattiva decresce col tempo e che essa si riduce a metà dopo un tempo ben determinato. Questo fatto si avvera quando si considera la sostanza radioattiva separata dalla sostanza madre, da cui essa proviene; quando invece vi è una sorgente che rigenera la sostanza, le cose vanno naturalmente in modo diverso. Facciamo al solito un esempio e scegliamo il caso della trasformazione del radio in emanazione. Supponiamo dunque di osservare una certa quantità di radio, dopo averne allontanato tutti i prodotti di decomposizione (emanazione, radio A, radio B, ecc.). Il radio si va disintegrando continuamente per dare origine ad emanazione, la quale a sua volta si trasforma in radio A. Siccome però solo una parte dell'emanazione formata si disintegra, in un primo tempo la quantità di emanazione andrà aumentando; man mano però che essa au-

menta, cresce anche il numero dei suoi atomi che si disintegrano. Ad un certo punto tanti atomi di emanazione si formano dal radio quanti se ne disintegrano trasformandosi in radio *A*: da questo momento la quantità di emanazione rimane costante. Si dice allora che « il radio e l'emanazione sono in equilibrio radioattivo ».

Lo stesso avviene nella trasformazione dell'emanazione in radio *A*: alcuni atomi di emanazione si trasformano in atomi di radio *A*; di questi solo una percentuale si disintegra, e quindi in un primo tempo il radio *A* si va accumulando. Crescendo la quantità di radio *A* aumenta il numero di atomi che si disintegrano e quindi, dopo un determinato tempo, la quantità di radio *A* che si decompone è uguale alla quantità che se ne forma.

Esiste però una differenza fra il primo caso (trasformazione del radio in emanazione) e il secondo (trasformazione dell'emanazione in radio *A* in assenza di radio). Questa differenza dipende dalla diversa vita media del radio e dell'emanazione: il radio infatti ha una vita media lunghissima e si riduce a metà in circa 1600 anni. La percentuale di radio che si disintegra dunque in un tempo anche relativamente lungo è talmente piccola che la quantità di radio iniziale si può in pratica considerare costante, e di conseguenza costante anche il numero di atomi che si disintegrano per ogni istante. Si comprende quindi che una volta raggiunto l'equilibrio, il radio rige-

Cassaforte in cui vien custodito il radio (sotto forma di cloruro di radio) nel Laboratorio Fisico della Sanità Pubblica.

nera continuamente l'emanazione che si disintegra e la quantità di emanazione in equilibrio col radio resta costante. Nel secondo caso invece l'emanazione, che si riduce a metà in meno di 4 giorni, tende ad estinguersi abbastanza rapidamente: si raggiunge è vero l'equilibrio, ma questo è transitorio: l'emanazione ben presto non fornisce più al radio *A* tanti atomi quanti sono quelli di esso che si decompongono, e quindi la quantità radio *A* tende a diminuire.

Il tempo necessario perchè una sostanza radioattiva si porti in equilibrio con la sostanza madre è fisso per ogni trasformazione e, come può facilmente intuirsi, dipende dalle velocità con cui le sostanze si decompongono. Così l'emanazione si trova in equilibrio col radio dopo circa due mesi da quando è cominciato il processo generativo; il radio *A* si porta invece in equilibrio con l'emanazione in circa 5 giorni.

L'equilibrio radioattivo si raggiunge non solo tra due elementi radioattivi, ma fra tutti i prodotti di trasformazione di una data sostanza. Così, quando dal capostipite di una famiglia radioattiva non si allontanino i prodotti di decomposizione, questi si troveranno in equilibrio radioattivo. E poichè la vita dei tre capostipiti è tanto enormemente lunga, la loro attività si può considerare anche più costante (perdonate l'improprietà del linguaggio) che nel caso del radio; perciò noi dobbiamo aspettarci di trovare costanti le quantità

dei diversi membri della famiglia, per esempio dell'uranio, in presenza con questo ultimo. Infatti, misurando fra l'altro le quantità di radio presenti in vari tipi di rocce uranifere, si è trovato che la percentuale del radio e dell'uranio è sempre la stessa. In particolare è costante la quantità di piombo stabile che si forma per unità di tempo, dalla disintegrazione successiva degli elementi appartenenti alle tre famiglie radioattive. Poichè il piombo è stabile, esso si va accumulando nelle rocce, e, come vedremo nel prossimo capitolo, dalla quantità relativa di piombo e di uranio in una roccia, si può risalire alla età di questa ultima.

Capitolo V

LE SOSTANZE RADIOATTIVE IN NATURA

Quando nel 1903 i coniugi Pierre e Marie Curie, studiando quali sostanze fossero radioattive, arrivarono alla scoperta del radio, che li rese immediatamente celebri, essi dovettero esaminare circa 7 tonnellate di pechblende provenienti dal giacimento di Joachimstal in Boemia, per separare un solo grammo di bromuro di radio. L'esigua quantità di radio contenuta in una così gran mole di materiale ci spiega la rarità di questo elemento e non ci fa apparire spropositato il suo prezzo, che supera il mezzo milione per grammo.

I coniugi Curie avevano scelto un materiale particolarmente ricco di sostanze radioattive; se avessero preso invece un materiale a caso, sulla crosta terrestre, avrebbero dovuto manipolarne una quantità 100 mila volte maggiore per ottenere lo stesso grammo di bromuro di radio. Le sostanze radioattive infatti, anche all'infuori di partico-

lari giacimenti, sono distribuite più o meno uniformemente in tutte le rocce che costituiscono la crosta terrestre; probabilmente anzi sono contenute anche nelle parti più interne del nostro globo, quantunque, per ovvie ragioni, ciò non possa affermarsi con sicurezza. Esse hanno una grandissima diffusione e si trovano presenti un po' da per tutto in piccolissime quantità: senza andarle a cercare troppo lontano, se ne trovano tracce fra l'altro nei materiali da costruzione delle nostre case, e nelle mura di un fabbricato di medie dimensioni, potranno essere contenuti una quarantina di chilogrammi di sostanze radioattive. Certamente 40 chili sono una quantità abbastanza ragguardevole, e forse da questo dato il lettore potrà sopravalutare la diffusione della radioattività; bisogna aggiungere, a commento di questo fatto, che la massima parte dei 40 chili è costituita da uranio e da altri elementi, che avendo una vita media lunghissima, si disintegrano lentissimamente e quindi si possono considerare quasi stabili. La quantità di sostanze a vita media breve, e quindi a rapida disintegrazione, è invece minima: per esempio tutto il radio contenuto nelle suddette mura, potrà ammontare sì e no a 4 milligrammi. E se si potesse separare tutto il radio contenuto nell'enorme massiccio del Monte Bianco, lo si potrebbe portar via con un solo carretto.

Anche nel mare e nei grandi fiumi sono conte-

nute sostanze radioattive, ma in percentuale circa 1.000 volte inferiore che nelle rocce. Esistono invece alcune sorgenti naturali di acque assai più radioattive che non quelle del mare e dei fiumi. In quello stesso Joachimstal, dove si trova un giacimento di pechblende uranifere, vi sono anche delle sorgenti di acque fortemente radioattive; del resto, sorgenti di quel genere, sebbene meno attive, esistono anche in Italia, nell'isola d'Ischia (sorgente Isabella) e a Lurisia, in Piemonte. Luoghi fortunati, se veramente sono benefici, come ritengono alcuni medici, gli effetti sugli organismi umani delle radiazioni radioattive, *in quantità non troppo grandi*. In queste sorgenti infatti è contenuta dell'emananazione che si sprigiona nell'aria circostante, per cui facendo bagni in esse si viene a respirare aria assai ricca di emanazione e si portano nell'interno dell'organismo le radiazioni da essa sprigionate. Vi sono poi delle sorgenti di acque che hanno un benefico effetto soltanto se bevute presso la sorgente stessa; quando esse vengono imbottigliate e non sono consumate subito, il loro effetto diminuisce, a quanto pare, considerevolmente, o sparisce del tutto. Si vuole trovare la spiegazione di questo fatto, supponendo che tali acque (fra cui quella di Fiuggi) siano radioattive, e che quindi la loro attività e il conseguente beneficio decadano rapidamente col tempo.

Che le radiazioni radioattive, *in quantità*

relativamente grandi, abbiano degli effetti dannosi sull'organismo umano, è cosa constatata a spese dei loro primi manipolatori. Fisici e radiologi si trovavano spesso sulle dita e sulle mani delle piaghe, molto simili per aspetto a comuni scottature; queste piaghe erano provocate dalle radiazioni radioattive (radiodermiti); mentre però l'avvicinare una mano a una fiamma produce istantaneamente un forte dolore che ci fa ritirare subito la mano, arrestando così il processo di ustione, l'esporre la pelle alle sostanze radioattive non produce nessuna sensazione, e la piaga può comparire anche dopo qualche giorno dall'esposizione. Avvenne perciò, quando ancora non si conosceva questo pericolo, che alcuni ricercatori si ustionassero a tal punto da avere le prime falangi delle dita atrofizzate. Attualmente si prendono precauzioni contro questo inconveniente, per esempio usando guanti di gomma; tuttavia forme più leggere di radiodermiti sono ancora frequenti negli istituti fisici in cui si lavori sulla radioattività, e nei gabinetti radiologici.

Le particelle *alfa* che sono assorbite molto facilmente, non possono avere che un'azione superficiale sul nostro corpo, limitato alla sola pelle. Le particelle *beta* invece, penetrano più profondamente e i raggi *gamma* infine, come i raggi X, possono attraversare il corpo umano.

Si pensò di provare se quantità ben dosate

di radiazioni radioattive, potessero avere degli effetti curativi: si trovò così che esse si possono usare con beneficio non solo in alcune malattie della pelle, ma anche in alcuni tumori esterni ed interni. Perciò attualmente molti ospedali hanno una dotazione determinata di radio o di emanazione a scopi terapeutici.

I raggi emessi dalle sostanze radioattive hanno un effetto anche sugli occhi: infatti portando una sostanza radioattiva in una stanza buia si ha un'impressione di luminosità. Tale impressione può aversi anche abbassando le palpebre, ed è dovuta allora ai soli raggi *gamma*, poichè i raggi *alfa* e *beta* sono assorbiti dalle palpebre. Anche i ciechi percepiscono la luminosità prodotta da questi raggi, purchè la cecità sia dovuta a cause che lascino intatta la retina.

Molte ricerche sono state fatte per determinare tutti gli effetti fisiologici delle sostanze radioattive; così si è visto per esempio che una pianta di fagiolo cresce più prosperosa se esposta a una piccola quantità di emanazione, e invece il suo sviluppo si arresta, se esposta a una quantità più grande (tav. VII). Ancora molti esperimenti e molti studi vanno fatti prima di poter stabilire con sicurezza tutti i casi in cui è vantaggiosa e tutti quelli in cui è nociva una applicazione di questo tipo di radiazioni.

***

Le sostanze radioattive hanno portato un valido aiuto nel computo dell'età della terra e delle rocce. Prima della scoperta della radioattività, i geologi avevano tentato di risalire all'età della terra dall'osservazione di fenomeni che hanno una certa regolarità nel tempo, quali i sedimenti alluvionali; tuttavia non si poteva avere la certezza che i sedimenti alluvionali si fossero andati sempre depositando con la velocità attuale, e l'età calcolata in questo modo non rappresentava che una prima approssimazione. Se si fosse trovato in natura un fenomeno che avvenisse con una regolarità simile al battito di un orologio, si sarebbe potuto usarlo come strumento di misura del tempo. Ora appunto le sostanze radioattive rappresentano un fenomeno quasi altrettanto regolare della marcia di un cronometro: la loro disintegrazione avviene nel tempo con velocità ben determinata, in modo che è possibile fare la storia di una certa quantità di esse e stabilire per esempio che percentuale di un grammo di uranio sarà ancora in vita tra un millennio, o ricostruire quale era un milione di anni fa la quantità di uranio di cui attualmente è in vita un solo grammo.

Altre due circostanze molto favorevoli rendono i fenomeni radioattivi particolarmente adatti per i calcoli delle età delle rocce: se le sostanze radio-

attive si disintegrassero tutte completamente anche solo in qualche millennio, come il radio che in 1600 anni si riduce a metà, nessuna di quelle che ancora esistono avrebbe potuto essere presente al momento della formazione della terra, ma tutte si sarebbero create in seguito, qualche millennio fa. L'esistenza di sostanze come l'uranio e il torio, che hanno vita media dell'ordine di grandezza dell'età della terra, ci spiega invece la presenza delle sostanze radioattive, e di più ci dà un metodo per risalire nel tempo fino al momento della formazione della terra. Questo fatto costituisce la prima circostanza favorevole.

Il metodo per calcolare l'età di una roccia uranifera, e in generale della terra, è basato sul fatto che l'uranio si trasforma a passo di lumaca, attraverso a tutti i membri della sua famiglia, in piombo e che è perfettamente noto il tempo necessario perchè da una determinata quantità di uranio si formi una determinata quantità di piombo. Misurando quindi la percentuale di uranio e di piombo in presenza l'uno dell'altro, si calcola il tempo che è stato necessario alla trasformazione. Però non tutto il piombo che si trova nelle rocce uranifere è di origine radioattiva; ciò costituirebbe una grossa difficoltà e se non fosse intervenuta la seconda circostanza favorevole, si sarebbe dovuto ricorrere ad altre particolarità delle trasformazioni radioattive; si potrebbe per esempio misurare la quantità di

elio rimasto incluso in una roccia, che si origina dalle particelle *alfa*, le quali, prima o poi, catturano ognuna due elettroni; questo metodo sarebbe un po' meno esatto, poichè l'elio è gassoso e può essersi in parte sprigionato dalle rocce e disperso nell'atmosfera. Fortunatamente le varietà di piombo che si producono dalle tre famiglie radioattive hanno peso atomico leggermente diverso tra loro (V. tabella a pag. 73) e diverso anche dal piombo di origine non radioattiva. Si può quindi determinare qual'è la quantità di piombo di origine uranifera, e da questa e dalla quantità di uranio presente, risalire all'età della terra.

***

Nel metodo ora esaminato per calcolare l'età di una roccia, ha importanza solo il fatto che le sostanze radioattive si trasformano le une nelle altre con regolarità, fino a dare un prodotto stabile che si accumula; non ha invece alcuna importanza il fatto che esse diano origine a radiazioni; eppure queste vengono emesse con regolarità nel tempo, e qualora fossero capaci di produrre un effetto nel mezzo che attraversano, l'entità di questo effetto deve essere matematicamente legata al tempo durante il quale esse hanno agito.

Effettivamente si è trovato un caso in cui un meccanismo di questo genere ha permesso di calcolare l'età di alcune rocce: vogliamo ac-

cennare agli « anelli pleocroici », trovati in alcune rocce contenenti mica (tav. VII). Per spiegarne la formazione dobbiamo segnalare una proprietà caratteristica delle radiazioni radioattive: queste sono capaci di produrre diverse colorazioni nell'attraversare varie sostanze, quali il vetro, il quarzo, la mica, e di far cambiare colore ad alcune sostanze già colorate, come lo zaffiro. In particolare le particelle *alfa* colorano rapidamente la mica in marrone o in nero. Questa colorazione, osservata a nicols incrociati, appare diversa nelle diverse direzioni degli assi cristallografici: essa presenta dunque la proprietà del pleocroismo.

I geologi già da tempo avevano osservato nelle sezioni di varie rocce contenenti mica, delle piccole aree circolari le quali presentavano una intensa colorazione pleocroica, non uniforme in tutta l'area; in essa si vedeva una zona centrale molto intensamente colorata, contornata da anelli di varia intensità. Il fisico inglese JOLY fu il primo a riconoscere che questi anelli pleocroici sono di origine radioattiva e a darne una spiegazione: all'atto della consolidazione delle rocce che contengono mica, (o anche altre particolari sostanze quali lo spatofluore) sono rimasti inclusi dei minutissimi granuli di uranio; questo, durante la sua disintegrazione, emette particelle *alfa*, in tutte le direzioni intorno a sè, e così pure le emettono i suoi prodotti di trasformazione. Le particelle *alfa* possono percorrere, in un determinato mezzo,

un tratto di lunghezza diversa, secondo la sostanza da cui sono state emesse; quelle di maggiore energia, e quindi capaci di percorrere un tratto più lungo in una data sostanza, sono quelle emesse dalle sostanze radioattive con vita media più breve. Nel caso degli anelli pleocroici dovuti a inclusioni di uranio, le particelle *alfa* producono una colorazione intorno al nucleo di disintegrazione: nella parte centrale, percorsa da tutti i tipi di particelle *alfa*, la colorazione è più intensa; intorno ad essa si formano delle zone in cui passano le particelle emesse solo da alcune delle sostanze derivanti dall'uranio e sono quindi meno intense: la zona più esterna per esempio, è dovuta ai soli raggi emessi dal radio *C'*. Il margine esteriore dell'ultimo anello è più scuro della parte immediatamente più interna; ma anche questo fatto è stato spiegato: le particelle *alfa*, nell'ultimo tratto del loro percorso, producono una ionizzazione più forte, e poichè la loro colorazione è certamente dovuta alla ionizzazione, l'anello in questo tratto diventa più scuro. La colorazione è distribuita dunque dentro una sfera e la parte più esterna di essa resta colorata a strati. Naturalmente in sezione questa sfera appare come una zona circolare, con anelli concentrici.

Misurando l'intensità della colorazione e deducendo, mediante osservazioni col microscopio, la quantità di sostanza radioattiva che doveva essere presente all'atto del consolidamento della

roccia, si può calcolare il tempo che è stato necessario per la formazione degli anelli pleocroici, e quindi avere una misura dell'età della roccia. Questo metodo è meno esatto del computo delle età per mezzo delle percentuali di uranio e piombo in presenza; tuttavia esso ha dato in genere dei risultati attendibili.

Fino a questo punto abbiamo esposto solo la parte passiva che hanno avuta le sostanze radioattive nella storia della geologia: esse hanno funzionato come un orologio che, caricato all'atto della formazione della terra, abbia continuato a battere fino ai nostri giorni. Ma oltre ad aver dato questo contributo già tanto grande, le piccole quantità di queste sostanze miracolose, sparpagliate per tutta la terra, hanno avuto un compito molto più attivo e personale: esse cioè sono state uno dei fattori che hanno regolato la velocità con cui la terra si è andata raffreddando.

Qualunque corpo immerso nel vuoto va lentamente perdendo calore, perchè lo irradia intorno a sè; così anche la terra, dall'epoca della sua formazione, si è andata gradatamente raffreddando, fino a raggiungere la sua temperatura attuale. Quando si parla di temperatura della terra bisogna fare una distinzione tra la c r o s t a e il n u-

cleo terrestre: la parte più esterna del nostro globo si è infatti raffreddata molto più rapidamente di quella interna, e la sua temperatura attuale è costante, poichè la quantità di calore che perde per irraggiamento è compensata da quella che le proviene dal sole. Il nucleo terrestre invece è assai più caldo della crosta e perciò deve perdere calore, attraverso agli strati esterni della terra: si riteneva dunque che non solo esso si fosse gradatamente raffreddato dall'epoca della formazione della terra fino a oggi, ma che il raffreddamento fosse destinato a continuare fino a che la temperatura del nucleo fosse diventata eguale a quella della crosta terrestre.

Se il nucleo terrestre si è raffreddato regolarmente, è evidente che il tempo che è stato necessario al suo raffreddamento fino alla temperatura attuale deve coincidere con l'età della terra; poichè si può presumere la temperatura che aveva la terra all'atto della sua formazione, è possibile calcolare il tempo che avrebbe impiegato il nucleo terrestre a raggiungere le condizioni attuali, se la sua temperatura fosse stata regolata dalla sola perdita di calore per irraggiamento. Ebbene, eseguendo il calcolo si trova che questo tempo è molto breve rispetto all'età della terra, e se ne deve concludere che altri fattori debbono essere intervenuti a ritardare il raffreddamento del nucleo.

La scoperta della radioattività è venuta a modificare e a chiarire le idee in proposito: infatti

le sostanze radioattive liberano continuamente piccole quantità di calore e, data la loro grande diffusione, il calore prodotto non è, nel suo complesso, trascurabile: esso ha compensato una piccola parte del calore perduto per irraggiamento dal nucleo terrestre e ha quindi rallentato il ritmo con cui questo si è andato raffreddando.

Per spiegare la produzione di calore da parte delle sostanze radioattive, ricordiamone per l'ennesima volta le proprietà: esse emettono particelle *alfa* e *beta* animate da alte velocità, e raggi *gamma*. Le particelle, per il fatto di avere una massa m e una velocità v, possiedono una energia eguale a $\frac{1}{2} mv^2$; se la massa delle particelle è molto piccola, è però molto grande la loro velocità: nel caso della particella *beta* essa può avvicinarsi ai 300.000 chilometri al secondo, valore della velocità della luce. L'energia quindi di una singola particella non è certamente trascurabile e, dato il grandissimo numero di particelle emesse dalle sostanze radioattive, l'energia complessiva dei raggi *alfa* e *beta* è assai grande. Ad essa si deve aggiungere l'energia dei raggi *gamma*, anch'essa non trascurabile; otterremo così l'energia totale dovuta alle trasformazioni radioattive.

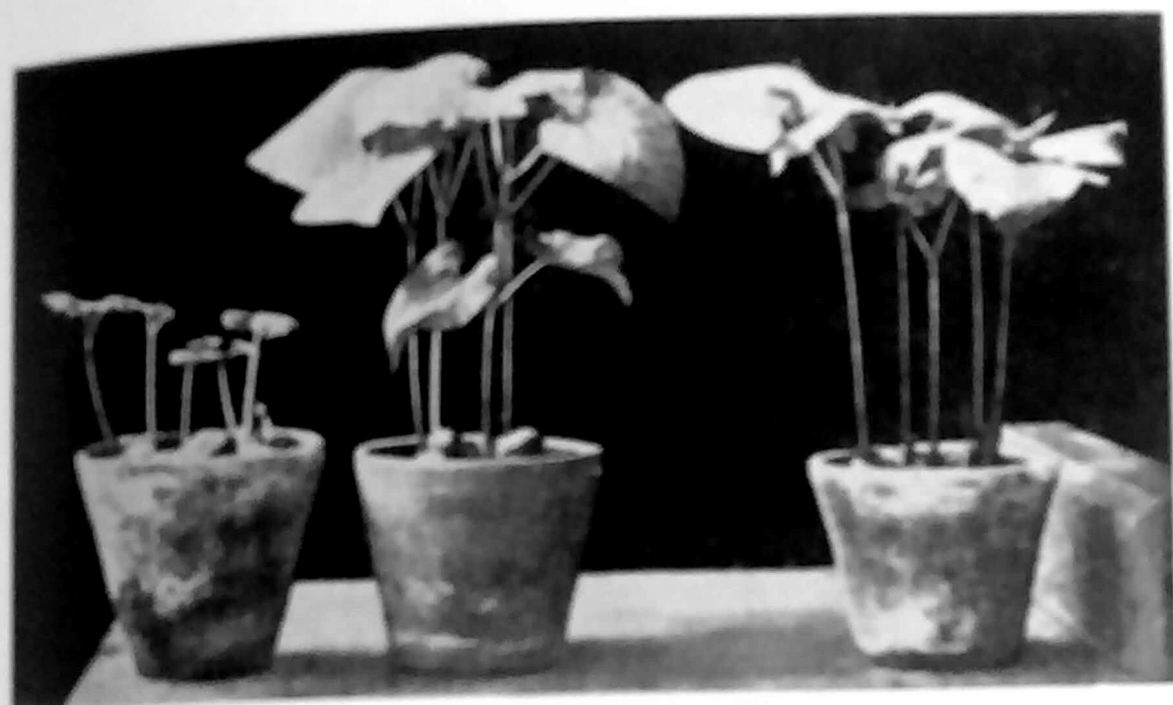
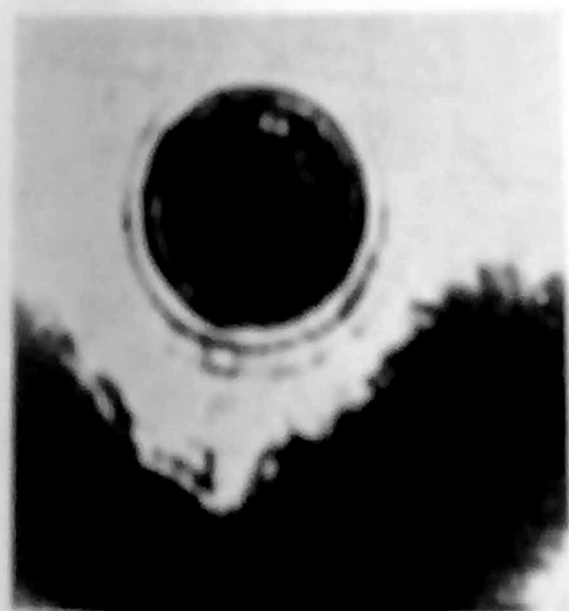
Dobbiamo avvertire, a scanso di equivoci, che il contenere energia non è una specialità degli elementi radioattivi. Gli atomi di tutti gli elementi contengono latenti delle grandissime quantità di energia; questa però vien conservata nel-

l'interno del nucleo, e non può venir emessa altro che quando il nucleo si spezzi. Per i nuclei stabili dunque l'energia non si manifesta all'esterno; i nuclei radioattivi invece, per mezzo delle loro radiazioni, emettono continuamente energia.

Ora, come tutti certamente sanno, qualsiasi forma di energia finisce sempre col trasformarsi in calore, ed è appunto questa la ragione per cui le sostanze radioattive sviluppano calore. Così un grammo di radio sviluppa 130 calorie per ogni ora, e nella sua trasformazione completa sviluppa tre miliardi di calorie. Per confronto facciamo osservare che se volessimo ottenere questi tre miliardi di calorie facendo bruciare del carbone, ne consumeremmo circa 4 quintali! L'energia delle sostanze radioattive si produce in maniera regolare e lentissima attraverso ai secoli, e, data la diffusione di queste sostanze, essa provoca un piccolo ma continuo aumento della quantità di calore della terra.

Per conoscere esattamente quanto calore sviluppano le sostanze radioattive in tutto il nostro pianeta, occorrerebbe conoscere la loro distribuzione non solo sulla crosta terrestre, ma anche nelle parti più interne. Poichè non abbiamo mezzi per fare misure dirette altro che per uno strato molto superficiale, possiamo fare solo delle supposizioni sulle percentuali di sostanze radioattive contenute nel nucleo terrestre, per analogia, per esempio, con le quantità che se ne osservano

Piante di fagiolo

Anelli pleocroici

Effetto particelle α
su lastra fotografica

nei meteoriti. Si hanno infatti buone ragioni per ritenere che i meteoriti provengano dallo stesso processo che ha provocato la formazione dei pianeti solari, e che quindi essi abbiano una costituzione analoga a quella della terra.

Queste supposizioni porterebbero alla conclusione che il calore sviluppato complessivamente dalle sostanze radioattive è maggiore di quello che attualmente il nucleo terrestre perde per irraggiamento; e si dovrebbe perciò ritenere che le parti più centrali del globo si vadano scaldando; secondo taluni questo fatto potrebbe costituire la spiegazione di alcuni fenomeni geologici, quali l'esistenza di ere di attività vulcanica assai intensa.

Prima di chiudere questo capitolo vogliamo ancora accennare ad un contributo indiretto portato dalla radioattività alla scienza.

Era noto da vario tempo che l'atmosfera terrestre è leggermente ionizzata. Dopo la scoperta di Becquerel si pensò che questa ionizzazione potesse essere dovuta al passaggio nell'atmosfera delle radiazioni, (soprattutto di quelle *gamma* che sono le più penetranti), emesse da sostanze radioattive terrestri e anche da piccole quantità presenti nell'atmosfera, quali l'emanazione di radio. Se la ionizzazione atmosferica fosse realmente causata da queste radiazioni, essa dovrebbe

diminuire con l'altezza. Furono fatte allora misure a varie quote con palloni e con palloni sonda, e i risultati si trovarono in contrasto con le previsioni: infatti, non solo l'atmosfera è ionizzata anche in strati molto elevati, nei quali non potrebbero arrivare nemmeno i più penetranti fra i raggi di origine terrestre, ma per di più, oltre una certa quota la ionizzazione aumenta con l'altezza. Si riconobbe così l'esistenza di un tipo di radiazione assai più penetrante di tutti gli altri raggi conosciuti e che per questo ha preso il nome di « radiazione penetrante ».

Poichè le misure hanno dimostrato che essa non è dovuta a cause terrestri, dobbiamo cercare le sue origini o negli alti strati dell'atmosfera o in regioni completamente al di fuori di tutto il nostro globo. La prima ipotesi affacciata dai fisici, che cioè la radiazione penetrante potesse originarsi dalle enormi tensioni che si producono nei temporali, fu presto scartata, poichè non si trovò alcuna relazione tra l'intensità della radiazione e la presenza dei temporali. Non è d'altra parte probabile che negli alti strati dell'atmosfera vi siano condizioni fisiche capaci di produrre radiazioni di così grande energia, le quali debbono quindi essere di origine extra terrestre. Esse non possono nemmeno provenire dal sole, perchè accurate misure hanno dimostrato che le proprietà della radiazione penetrante non cambiano affatto dal giorno alla notte. Bisogna dunque pensare che essa

ci provenga da mondi lontani (e perciò la radiazione penetrante si chiama anche « radiazione cosmica »), nei quali condizioni fisiche della materia, molto diverse da quelle che siamo abituati a considerare, provocherebbero l'emissione di una radiazione così penetrante da essere capace di percorrere cammini straordinariamente lunghi per giungere fino a noi.

CAPITOLO VI

COME SI RIVELANO LE RADIAZIONI RADIOATTIVE

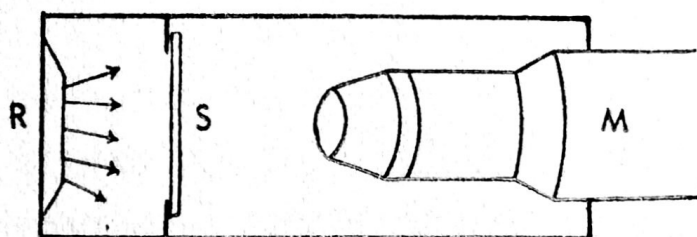
Intorno a ogni granulo di sostanza radioattiva vi è un piccolo mondo in agitazione: in grandissimo numero fuggono corpuscoli lillipuziani che corrono inverosimilmente veloci, e accanto a loro passano delle onde di frequenza enorme. Eppure l'uomo che prenda in mano un pezzettino di radio non vede che questo, fermo e immobile, e non si accorge del brulichio che gli si forma intorno. Come rivelare allora tutto lo sciame delle particelle radioattive, come svelare il passaggio di quelle onde che non si vedono e non si sentono?

L'intelligenza dell'uomo, che a volte sembra miracolosa, ha provveduto anche a questo, ed è riuscita perfino a educare le particelle radioattive a suonare un campanello posto sul loro cammino o ad agire come dive del cinematografo, per modo che se non è possibile vedere direttamente un elettrone, si può però sentire lo squillo del campanello che lo annuncia, o vedere i suoi movimenti riprodotti in un film.

Ma procediamo con ordine: un primo modo per mettere in evidenza questi corpuscoli è stato suggerito dall'esperienza stessa di BECQUEREL. Come le radiazioni emesse dai sali di uranio hanno impressionato delle lastre fotografiche, così si possono fotografare le radiazioni emesse da tutte le sostanze radioattive. Le particelle *alfa*, che sono più presto e completamente assorbite nello strato di gelatina che riveste la lastra, dànno un fortissimo annerimento: guardando la lastra al microscopio in alcuni casi si può arrivare a vedere la traccia di una singola particella *alfa*. Bellissime fotografie sono state fatte delle particelle *alfa* irradianti da un piccolo granulo di sostanza radioattiva (tavola VII). Le migliori fotografie sono quelle delle particelle che arrivano quasi tangenzialmente sulla lastra fotografica e che quindi sfiorano la gelatina. Anche i raggi *beta* hanno una forte azione fotografica, mentre i raggi *gamma* l'hanno assai più debole; tuttavia con metodi speciali si può rinforzare la loro azione sulla gelatina delle lastre e ottenere così anche loro fotografie.

Un altro metodo, sempre assai semplice, può servire a rivelare soltanto le particelle *alfa* e i protoni; esso ha avuto tuttavia molta importanza perchè ha servito a mettere in evidenza le particelle provenienti dalla disintegrazione dei nuclei,

nelle prime esperienze di trasmutazioni artificiali. Il principio su cui esso si basa è il seguente: se esponiamo una sostanza fosforescente all'azione delle particelle *alfa* o dei protoni, questi hanno il potere di eccitare la sostanza, in modo che essa emetta della luce; è stato osservato che questo effetto è particolarmente elevato se si sceglie come sostanza fosforescente il solfuro di zinco: esponendo uno schermo coperto di solfuro di zinco in minutissimi cristallini all'azione dei raggi *alfa*, si vede su di esso una brillante luminosità. Se si osserva lo schermo con una lente di ingrandimento, si riconosce che la luminosità è prodotta da numerose scintilline, ognuna delle quali è dovuta all'urto contro lo schermo di una singola particella. Lo spintariscopio è un apparecchio costituito appunto da un piccolo schermo

Fig. 10. — Lo spintariscopio. *M* microscopio; *S* schermo coperto di solfuro di zinco; *R* sorgente delle particelle alfa.

di vetro (di circa un centimetro quadrato di superficie) coperto di solfuro di zinco; da una parte dello schermo si trova un microscopio, mentre dall'altra vi è un sostegno, sul quale si mette un granulo di sostanza radioattiva (fig 10). L'osservatore, ponendo l'occhio al microscopio, non solo vede le scintilline per trasparenza, attraverso lo

schermo di vetro; ma, poichè ogni scintillina è prodotta da un urto di una particella *alfa* contro la sostanza fosforescente, egli, contando le scintilline, viene a contare le particelle *alfa*.

Anche chi non possiede questo semplicissimo apparecchio potrà, volendo, divertirsi a contare le particelle *alfa*: tutti possiedono in casa un orologio a quadrante luminoso. Ebbene la luminosità del quadrante è prodotta proprio nel modo descritto: a una sostanza fosforescente è mescolata una piccolissima quantità di sostanza radioattiva; questa spara delle particelle *alfa* e rende così luminosa la sostanza fosforescente. Guardando il quadrante luminoso con una lente di ingrandimento, si possono individuare le numerose scintilline, che nell'insieme dànno l'impressione di luminosità continua.

Per rivelare le radiazioni radioattive si può anche sfruttare una loro proprietà, alla quale abbiamo già accennato, cioè la loro capacità di ionizzare i gas. Quando una particella carica, avente sufficiente energia, passa attraverso alla materia, e in particolare attraverso ai gas, essa va a sbatacchiare contro i vari atomi. Un atomo costituisce un bersaglio relativamente grande per i corpuscoli radioattivi, perchè le sue dimensioni sono grandi rispetto a quelle delle particelle ur-

tanti; quasi tutto il volume di un atomo è a disposizione dello sciame di elettroni, poichè il nucleo è condensato nel centro, e può considerarsi come un minuscolo puntolino, anche rispetto alle grandezze atomiche. Per dare un'idea delle dimensioni relative dell'atomo e del suo nucleo, pensiamo di poter ingrandire un atomo fino a fargli acquistare le dimensioni di una piccola biglia di un centimetro di diametro: il nucleo sarà ancora tanto piccolo che non lo si potrà vedere a occhio nudo, e apparirà come un piccolo punto se osservato con un potente ultramicroscopio. E per far diventare il nucleo come la suddetta biglia, dovremo ingrandire l'atomo fino a che abbia un chilometro di diametro.

Data l'estrema piccolezza del nucleo in confronto con l'atomo, l'urto di una particella radioattiva con un nucleo è un fenomeno tanto raro da poterlo per il momento trascurare. Quindi gli urti di una particella carica contro un atomo si riducono a urti contro gli elettroni satelliti. Potrebbe far meraviglia che, nonostante l'estrema piccolezza di un elettrone, gli urti siano così fitti. Ciò invece si spiega se si considera che due particelle cariche di elettricità esercitano delle forze le une sulle altre anche a distanza: forze attrattive, se le particelle hanno elettricità di segno opposto, repulsive se cariche con elettricità dello stesso segno. Perciò una particella carica ha il privilegio di dare uno spintone a un elettrone e fornirgli l'energia

necessaria per farlo uscire a gran corsa dall'atomo, anche senza toccarlo materialmente. Quando un atomo perde in questo modo un elettrone che è carico negativamente, quel che resta di esso è carico positivamente e prende il nome di ione.

Una particella *alfa*, data la sua più grande massa, produce un numero di ioni più grande che non una particella *beta*. Si dice perciò che la particella *alfa* ha potere ionizzante maggiore della particella *beta*. Anche i raggi *gamma* sono capaci, passando attraverso alla materia, di produrre alcuni pochi ioni; il fenomeno in questo caso è un po' più complicato e lo spiegheremo a parte.

Ogni particella che passa in un gas genera dunque sul suo cammino un gran numero di ioni. Una particella *alfa* per esempio può produrre circa 10.000 ioni per ogni centimetro che essa percorre nell'aria; e poichè prima di fermarsi completamente può percorrere qualche centimetro, essa produce in tutto qualche decina di migliaia di ioni, ognuno dei quali naturalmente porta una carica elettrica. Esistono diversi apparecchi capaci di rivelare l'elettricità relativamente considerevole che si è prodotta al passaggio delle radiazioni radioattive. Abbiamo già detto, per esempio, che la ionizzazione di un gas può esser messa in evidenza con un elettroscopio. Vogliamo ora descrivere altri due apparecchi che sfruttano, per rivelare la presenza di radiazioni radioattive,

Fig. 11.

E

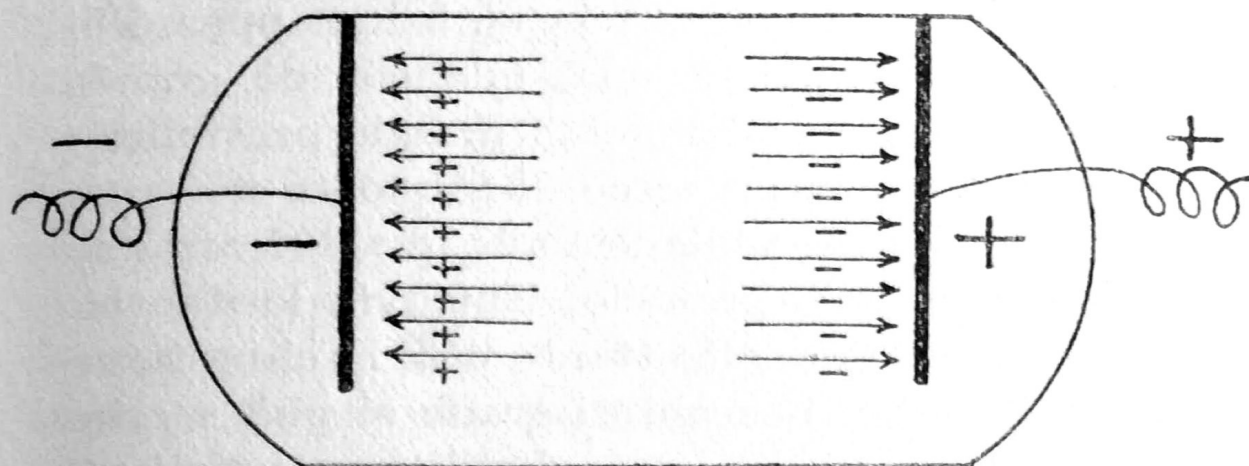
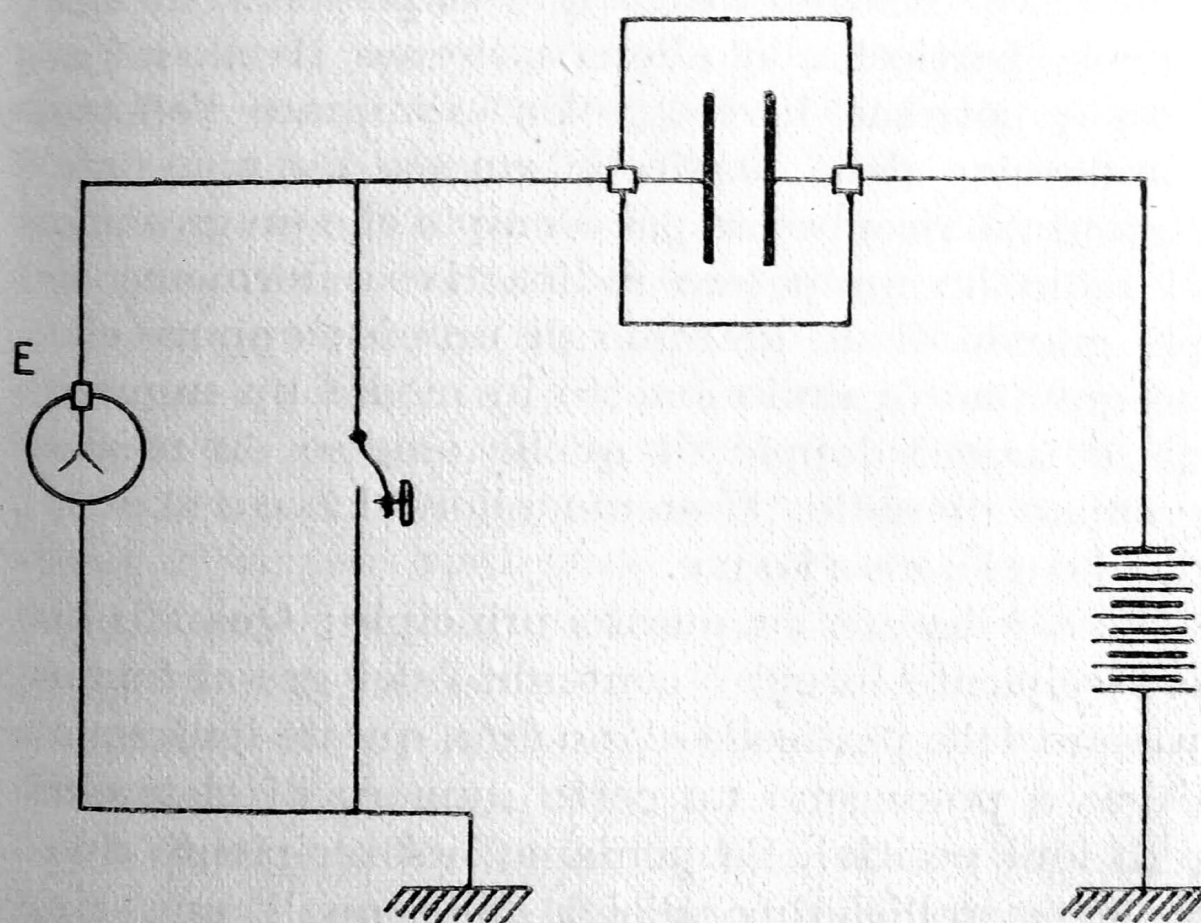



Fig. 11 *bis*. — Schema del funzionamento di una camera di ionizzazione.

la loro capacità di ionizzare i gas. I due apparecchi stanno tra loro come una bilancia di grande portata sta a una bilancia di grande sensibilità: se vogliamo pesare un sacco di frumento non possiamo usare la stessa bilancia alla quale ricorriamo per pesare un solo granello. Tuttavia le due bilance possono essere altrettanto utili in circostanze diverse: il pesare i sacchi di grano ci può servire per esempio per valutare la fertilità, nei riguardi del frumento, di una determinata zona; il pesare un solo granello può servire invece per esempio a determinarne la qualità. In modo analogo possiamo aver bisogno di rivelare la presenza di una singola particella, e allora useremo il contatore; potremo invece voler esaminare l'effetto complessivo delle particelle emesse da una data sostanza, e riconoscere per esempio che un grammo di radio ha un potere radioattivo enormemente più grande di un grammo di uranio; oppure che un grammo di radio emette in media un numero di radiazioni doppio di quelle emesse da mezzo grammo di radio. Useremo allora la camera di ionizzazione.

Essa è basata su questo principio: Quando in un recipiente in cui è contenuto del gas si fanno passare delle particelle *alfa* o *beta*, queste ionizzano il gas e producono un certo numero di elettroni e di ioni positivi. Se poniamo nel recipiente due lastre metalliche parallele, delle quali una sia carica positivamente e l'altra negativamente, gli

elettroni saranno attirati verso la lastra positiva e gli ioni positivi verso quella negativa (figg. 11 e 11 *bis*). La pressione del gas nell'interno del recipiente e la carica delle lastre si possono regolare in modo che tutte le particelle cariche che si formano arrivino a depositarsi sulle lastre. Il complesso di ioni positivi che vanno così a scaricarsi sulla lastra negativa, diminuiranno un pochino la carica di questa, mentre, per la stessa ragione, gli elettroni produrranno una piccola diminuzione nella carica della lastra positiva. Si è prodotta così una diminuzione tra la differenza delle cariche (differenza di potenziale) delle due lastre, la quale può misurarsi con un apparecchio chiamato elettrometro; essa è tanto maggiore quanto maggiore è il numero degli ioni esistenti nella camera e quindi quanto più grande è il numero delle particelle radioattive entrate e il loro potere ionizzante.

Quando, con una camera di ionizzazione si vogliano studiare le particelle *alfa*, la sorgente radioattiva si pone all'interno dell'apparecchio, perchè le pareti di questo assorbirebbero le particelle *alfa*, che sono poco penetranti. Le particelle *beta* e i raggi *gamma* sono invece assai più penetranti, e quindi la loro ionizzazione può misurarsi tenendo la sorgente radioattiva all'esterno dell'apparecchio.

Per fare qualsiasi misura con la camera di ionizzazione, bisogna tener presente che il gas in essa contenuto è sempre debolissimamente ioniz-

zato, anche in assenza di sorgenti radioattive. Questo fatto non può meravigliare quando si ricordi che le sostanze radioattive sono diffuse in piccolissima quantità in tutti i materiali. Quindi le pareti del recipiente ne conterranno qualche traccia, e così pure le mura del laboratorio. Queste tracce di sostanze radioattive sprigioneranno delle debolissime radiazioni che entrando nella camera di ionizzazione produrranno qualche ione. Esiste inoltre, come abbiamo già visto, un altro tipo di radiazione, cioè la radiazione cosmica o penetrante, la quale è presente un po' da per tutto nella nostra atmosfera e produce una debole ionizzazione; non si sa molto sulla sua natura: con certezza si è constatato soltanto che essa è complessivamente assai più penetrante di tutte le altre radiazioni conosciute.

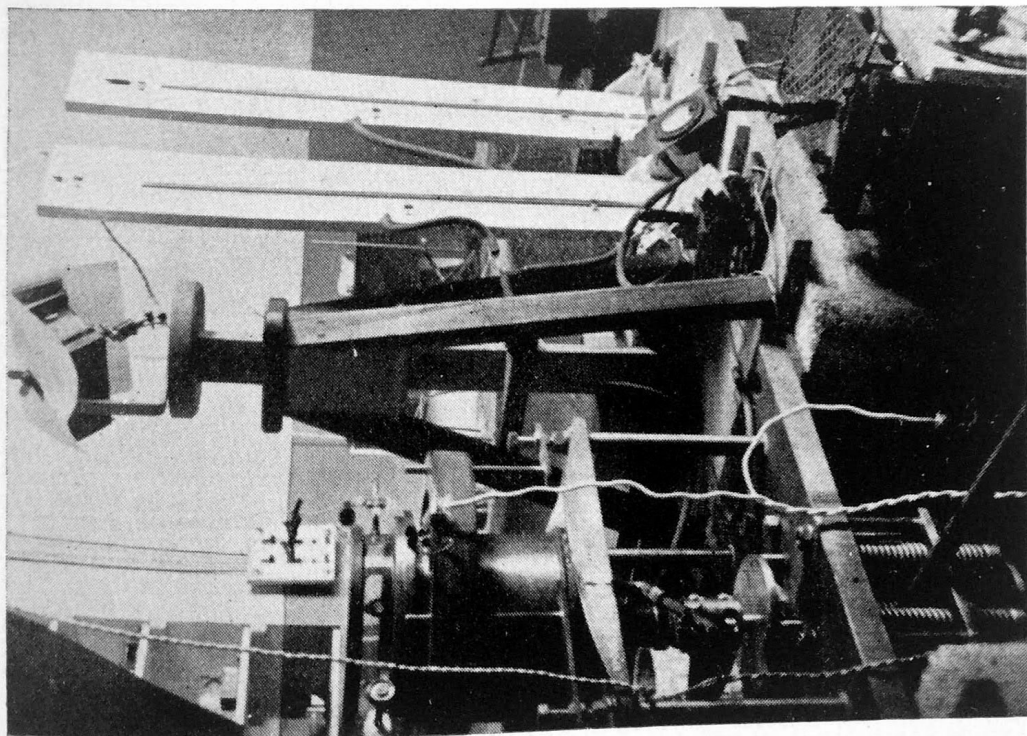
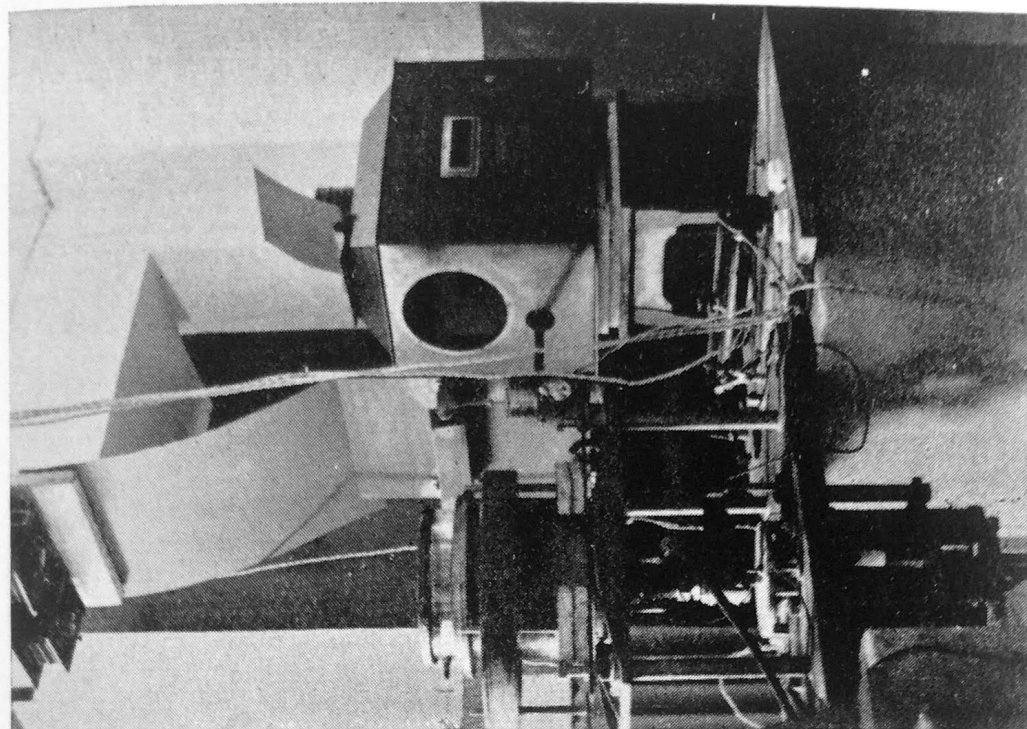
Prima di eseguire una misura con la camera di ionizzazione bisogna perciò determinare la sua ionizzazione spontanea dovuta a tutte le cause estranee alla sorgente radioattiva. Questa operazione si rende necessaria non solo usando una camera di ionizzazione, ma tutte le volte che si adoperano apparecchi nei quali si misurano gli effetti di radiazioni elettromagnetiche o corpuscolari. E d'ora innanzi considereremo sottinteso, anche senza ripeterlo esplicitamente, che prima di usare tutti questi apparecchi si misura il loro *effetto di zero*, cioè la loro ionizzazione spontanea.

Esaminiamo ora come si possa svelare il passaggio delle singole particelle, e facciamo a questo scopo un paragone. In molti studi di professionisti, uffici, negozi.... la porta d'ingresso non è chiusa dall'interno, e si può entrare senza suonare volontariamente il campanello; però in questi casi la porta d'ingresso è spesso collegata automaticamente con un campanello, il quale suona da sè quando una persona apre la porta e avverte così che qualcuno è entrato. Il rumore di una persona che apre la porta e il suo passo possono non essere sentiti, ma lo squillo del campanello è ben sensibile e non c'è caso che esso passi inavvertito.

Nel contatore si è ricorso a un artificio del genere: esso è fatto in modo che una particella, la quale non si potrebbe certamente sentire nè vedere, entrando in esso dà un impulso a uno speciale avvisatore. Esistono due tipi di contatori molto simili tra loro: il contatore a punta e quello a filo. Il secondo può considerarsi come un perfezionamento del primo e ormai esso viene usato assai più del contatore a punta, il quale può tuttavia presentare alcuni vantaggi in qualche caso speciale. Le differenze di funzionamento tra i due tipi di apparecchi sono piccole, nè potremmo spiegarle senza entrare in dettagli troppo tecnici per la nostra trattazione. Descriviamo quindi il solo contatore a filo (fig. 12), il quale è costituito da un tubetto metallico chiuso da due tappi iso-

Fig. 12. — Il contatore a filo.

lanti; ad essi è fissato un filo, metallico esso pure, che attraversa il tubetto lungo il suo asse. Il tubo e il filo vengono caricati in modo da stabilire tra loro una differenza di potenziale assai forte, appena inferiore a quella che produrrebbe la scarica. Se allora entra nel contatore una particella carica, la ionizzazione dovuta ad essa è sufficiente a produrre la scarica, la quale viene registrata da un elettrometro. Il dispositivo è fatto in modo che la scarica sia istantanea e che il filo e il tubo vengano immediatamente ricaricati per segnalare l'ingresso nel contatore della successiva particella. Il tubo metallico può venir sostituito da una griglia, quando si debbano far entrare in esso delle particelle poco penetranti che sarebbero assorbite anche da un sottile strato metallico.

È noto che una scarica elettrica anche molto piccola, può amplificarsi fino ad acquistare molte possibilità. La scarica che si produce nel contatore può anch'essa venire amplificata quanto si voglia,

a) La camera di Wilson (visibile sulla sinistra della fotografia) con gli accessori.

b) La camera di Wilson con l'apparecchio di illuminazione.

facendola passare attraverso a opportuni amplificatori, simili a quelli usati in radiotelefonia. Quando essa abbia così raggiunto un valore sufficientemente grande, la si può rivelare in molti modi; per esempio la si potrebbe usare per far squillare un campanello, e allora a ogni ingresso di una particella nel contatore si udrebbe una scampanellata. Generalmente però si collega il contatore o ad un alto parlante o ad un numeratore automatico: nel primo caso la scarica, dopo essere stata amplificata, si rivela con un colpo secco nell'altoparlante, il quale ci annuncia così l'ingresso di una particella nel contatore, come un compito maggiordomo annuncia al padron di casa l'ingresso di un ospite; nel secondo caso gli impulsi trasmessi dal contatore fanno scattare un numero. Quindi, regolata la sorgente radioattiva e il contatore in modo che le particelle non entrino troppo fitte in esso e i loro effetti non si sovrappongano, e posto il numeratore a zero, il fisico può abbandonare tranquillamente l'esperienza a se stessa, e tornando dopo un certo tempo leggere sul numeratore automatico il numero delle particelle, che si sono dunque contate da sè. Entrando in una stanza in cui sia in funzione questo metodo per rivelare le particelle, si sente un tac-tac non completamente uniforme che ci ricorda molto il rumore di una macchina da scrivere usata da un dattilografo veloce.

Con l'uso del contatore possiamo dire di essere

arrivati a sentire le singole particelle. Dobbiamo ora finalmente descrivere un apparecchio, la camera di WILSON, che ci permette di vedere le particelle, vedere come esse si muovono, come camminano rettilineamente, come vengono deviate, se urtano contro un corpo estraneo; che ci permette insomma di pedinare con gli occhi le particelle passo passo lungo il loro cammino.

Si comprende come questo apparecchio sia considerato il più mirabile fra tutti quelli che rendono sensibili le radiazioni radioattive, e che a C. T. R. WILSON sia stato assegnato il premio Nobel appunto per aver ideato la sua camera. La camera di Wilson è stata chiamata dal fisico ENRICO PERSICO « una finestra aperta sul mondo atomico »: e infatti affacciandosi a essa possiamo osservare cosa fanno gli atomi e goderci uno spettacolo non in altro modo visibile.

Prima di passare a descrivere l'apparecchio di WILSON vi rivolgiamo una domanda: sapete cos'è la nebbia e come si produce? Tutti crederete certamente di poter rispondere di sì; ma se provate a formulare il vostro pensiero e a rispondere la nebbia è.... probabilmente vi troverete un po' imbarazzati. La nebbia, vi veniamo noi in aiuto, è costituita da un grandissimo numero di goccioline d'acqua, al centro di ciascuna delle quali si trova un granellino di pulviscolo atmosferico. L'umidità atmosferica in condizioni normali non

può superare un certo valore, raggiunto il quale l'aria è satura di vapore acqueo; questo valore varia secondo la temperatura e precisamente è tanto più basso quanto minore è la temperatura. Perciò quando dell'aria satura di vapore si va raffreddando, una parte di questo si condensa e si trasforma in acqua. Può però accadere che l'aria si raffreddi un po' bruscamente, per esempio col calar della notte; il vapore non ha in questo caso il tempo di condensarsi, e l'aria resta perciò soprassatura di vapore. Ora i vapori soprassaturi sono instabili e qualsiasi impurità presente in essi ne produce la condensazione. Così il pulviscolo atmosferico agisce da centro di condensazione e intorno a ogni granellino di esso si forma una gocciolina, ma così piccola e così leggera da poter rimanere sospesa nell'aria. Si spiegano in questo modo le fittissime nebbie che per lunghi mesi avvolgono Londra e in genere le città industriali: le numerose ciminiere scaricano continuamente nell'aria piccole impurità in modo da rendere più denso il pulviscolo atmosferico, intorno al quale si condenserà l'umidità, non appena, per speciali condizioni climatiche, l'aria diventi soprassatura di vapore.

Torniamo ora all'argomento di partenza: WILSON si accorse che gli ioni prodotti dal passaggio delle radiazioni radioattive funzionano ottimamente da nuclei di condensazione per il vapore soprassaturo. Se per esempio una particella attra-

versa dell'aria contenente vapore soprassaturo, essa produce sul suo percorso una fila di ioni intorno ai quali si condensa l'umidità. Il risultato finale è la formazione di un filo di nebbia, che si vede molto luminoso e brillante quando venga illuminato da un forte fascio di luce.

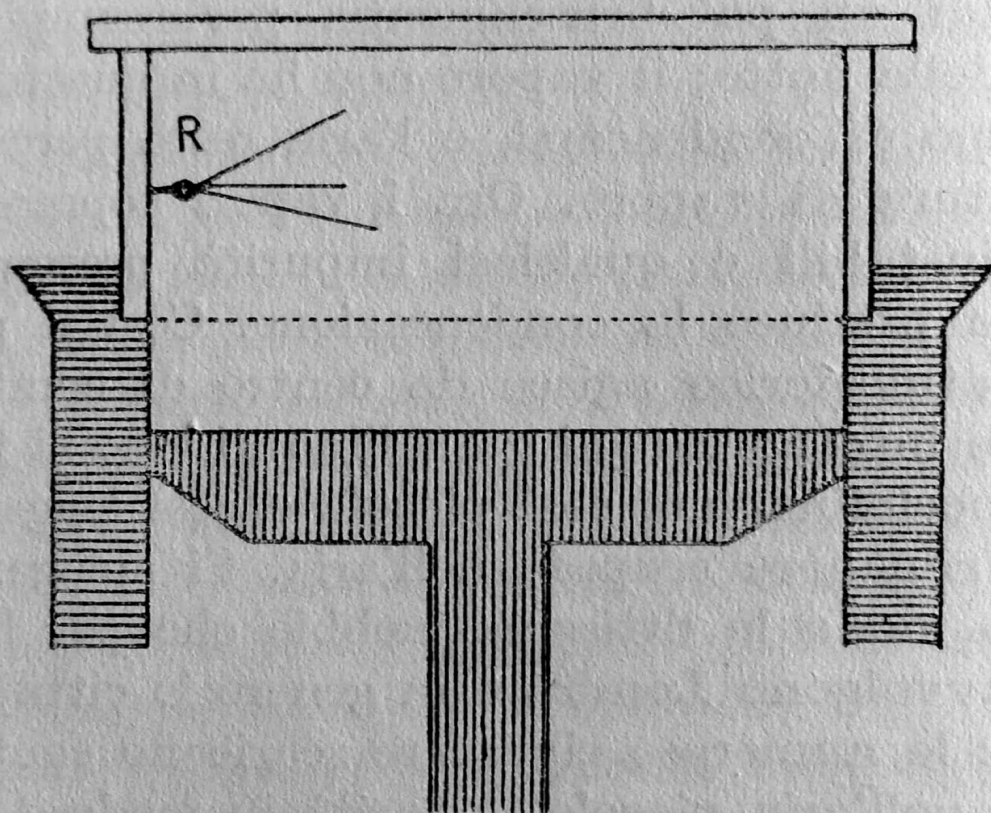



Fig. 13. — Schema della camera di Wilson.

L'apparecchio di Wilson (fig. 13 e tav. VIII) serve appunto per produrre un vapore soprassaturo che si condensi intorno agli ioni. Esso consiste in un grosso cilindro di vetro, dentro cui si pone una miscela di aria e vapor d'acqua; in esso scorre un pistone a tenuta, in modo da poter variare il volume a disposizione del gas. Abbassando bruscamente il pistone la miscela di aria e vapor

d'acqua si espande e quindi si raffredda; se il vapore acqueo era inizialmente saturo, ora esso è soprassaturo e il passaggio di una particella lascia la sua traccia poichè produce un filo di nebbia.

Per fotografare i percorsi delle particelle con la camera di Wilson si dovrà illuminarla fortemente per un solo istante all'atto stesso dell'espansione. I fili di nebbia che diffondono molta luce impressionano la lastra e appaiono come fili bianchi sulla positiva. Volendo sorprendere fenomeni rari, quali per esempio la disintegrazione artificiale di un nucleo, occorre fare il più gran numero possibile di espansioni e quindi fotografarle, sperando di cogliere, almeno su qualcuna delle fotografie, il fenomeno in esame. Spesso perciò la camera di Wilson è munita di un dispositivo automatico che fa muovere il pistone per mezzo di un motore ad intervalli di tempo brevi e regolari. Un altro dispositivo, sempre automatico, elimina ad ogni espansione gli ioni che si sono formati precedentemente, per esempio attirandoli su due lastre cariche. Le tracce vengono fotografate sopra un film cinematografico; in questo modo si può fare un gran numero di fotografie, in breve tempo e con poca fatica, una volta regolato l'apparecchio. Volendo ricostruire la posizione delle tracce nello spazio, si fanno delle fotografie stereoscopiche.

***

Un occhio appena un po' esercitato riconosce a prima vista a che tipo di particella è dovuto un filo di nebbia nella camera di WILSON. La traccia di una particella *alfa* è infatti grossa, generalmente rettilinea e piuttosto corta; quella di una particella *beta* è più tenue, più lunga e indica un percorso irregolare (tav. IX *a*). Queste differenze si spiegano facilmente pensando alle caratteristiche delle due particelle: la particella *alfa*, che ha un forte potere ionizzante, forma, per ogni centimetro di percorso nell'aria, circa dieci mila ioni, intorno ai quali si forma la nebbia, e per questo la sua traccia è spessa. La particella d'altra parte vien molto rapidamente frenata nell'attraversare la materia, e presto si ferma del tutto; perciò la sua traccia è corta. Infine poichè la particella *alfa* è pesante, gli urti contro i leggerissimi elettroni non la deviano affatto e il suo cammino è rettilineo.

Una particella *beta* invece produce solo cento ioni per centimetro ed ha un potere penetrante assai maggiore che non una particella *alfa*: in corrispondenza essa produce una traccia più sottile e più lunga; gli urti con altri elettroni producono frequenti deviazioni per cui il suo cammino prende un andamento irregolare.

A volte dalla traccia di una particella se ne

vede diramare un'altra più leggera: questa seconda traccia ci indica anch'essa la presenza di ioni: essi sono formati da un elettrone a cui la particella ha impresso, urtandolo, una forte velocità. La ionizzazione prodotta da questo secondo elettrone si chiama secondaria.

Guardando con la camera di WILSON un gran numero di tracce prodotte da particelle *alfa* se ne incontra ogni tanto una (circa 1 ogni 100) in cui si può osservare l'urto contro un nucleo. Una particella *alfa* urtando un nucleo viene deviata dalla sua traiettoria e il nucleo urtato viene messo in movimento in una direzione che forma un certo angolo con quella assunta dalla particella dopo l'urto: si vede allora nella camera di WILSON una traccia che a un certo punto si biforca in due diramazioni. In base a considerazioni teoriche si prevede che quando due corpuscoli si urtano, le direzioni dei loro movimenti dopo l'urto, formano un angolo che è acuto, se il corpuscolo urtante è più pesante di quello urtato; ottuso nel caso contrario, e finalmente retto se i due corpuscoli hanno lo stesso peso. Si verifica effettivamente che così avviene per gli urti delle particelle *alfa* con un nucleo: nella tavola XI sono riportate le fotografie di tre diversi casi di urto. Nella prima la particella *alfa* urta un nucleo di idrogeno, quattro volte più leggero della particella urtante; infatti i due rami della biforcazione formano un angolo acuto. Per di più, dalla gros-

sezza dei due rami si può distinguere quale di essi è dovuto alla particella *alfa*: infatti quest'ultima, avendo una massa maggiore, ha anche un potere ionizzante maggiore, e quindi la sua traccia è più spessa di quella del nucleo di idrogeno. Nella seconda fotografia è colto l'urto di una particella α contro un nucleo di elio (cioè nucleo di elio contro nucleo di elio): poichè i due corpuscoli sono uguali le loro tracce dopo l'urto formano un angolo retto. L'ultima fotografia infine mostra l'urto di una particella *alfa* con un nucleo di ossigeno, 4 volte più pesante: le due biforcazioni formano un angolo ottuso.

In circostanze speciali si sono viste delle grosse tracce che non cominciavano nè dalla sorgente radioattiva nè dalle pareti della camera di Wilson, ma in mezzo ad essa (tav. IX, *c*); una di queste tracce può spiegarsi solo ammettendo che una particella non ionizzante sia entrata nell'apparecchio e che per urto abbia messo in moto un nucleo, il quale ha provocato la formazione del filo di nebbia. Vedremo in seguito che la particella non ionizzante, ma capace di imprimere una certa velocità a un nucleo, è un « neutrone ».

Prima di chiudere questo capitolo dobbiamo ancora occuparci del meccanismo con cui i raggi *gamma* possono produrre una ionizzazione nei gas che attraversano. Come una violenta raffica di vento può sradicare degli alberi e scoperchiare

delle capanne che si trovino sul suo cammino, così la radiazione *gamma* può, investendo un atomo, strapparne un elettrone abbastanza veloce per produrre una ionizzazione osservabile. E come dal numero e dalla posizione degli alberi sradicati possiamo determinare la violenza e il percorso della raffica, così si può risalire all'energia e al percorso dei raggi *gamma* osservando la ionizzazione secondaria prodotta nel gas dagli elettroni strappati agli atomi da questa radiazione.

Per spiegare come una radiazione elettromagnetica, che per natura è analoga alla luce, possa per urto strappare un elettrone ad un atomo, bisogna ricordare come si interpreta l'emissione di energia nella meccanica dei quanti. Un elettrone periferico di un atomo non ruota necessariamente sempre sull'orbita più interna fra quelle che esso può occupare, alla quale compete la minore energia: per varie cause (riscaldamento, passaggio di radiazioni, ecc.....) l'energia dell'elettrone può aumentare ed esso può passare a un'orbita più esterna; su questa si trattiene un certo tempo, ma prima o poi torna all'orbita più interna, emettendo l'eccesso di energia in forma di un gruppetto di onde elettromagnetiche. La quantità di energia emessa nel passaggio da un'orbita a quella più interna prende il nome di q u a n t o o g r a n u l o d i e n e r g i a o f o t o n e; essa è perciò eguale alla differenza fra le energie che competono alle due orbite.

Vediamo dunque che i quanti possono assumere soltanto alcuni determinati valori, ognuno dei quali corrisponde al passaggio fra due determinate orbite. Due quanti diversi, cioè emessi da due elettroni che compiono il passaggio tra due diverse coppie di orbite, si manifestano come gruppetti di onde di diversa frequenza. La luce, i raggi ultravioletti, i raggi X ecc.... si possono dunque pensare costituiti da un certo numero di pezzettini di energia di determinate grandezze, emessi da molti atomi, in ognuno dei quali un elettrone è passato da un'orbita a un'altra più interna.

Nel caso dell'emissione di raggi *gamma* le cose sono un po' più complicate poichè essi non vengono emessi dall'atomo, bensì dal nucleo. Tuttavia la loro emissione si spiega ammettendo l'esistenza di stati quantici all'interno del nucleo, perfettamente analoghi a quelli dell'atomo; di più una radiazione *gamma* è costituita anch'essa da un grandissimo numero di quanti che possono assumere solo alcune determinate grandezze, proprio come tutte le altre radiazioni elettromagnetiche; quindi la descrizione che abbiamo data è valida anche per i raggi *gamma*.

Bisogna insistere sul fatto che un quanto è una cosa ben definita e fissa; il gruppetto d'onde che lo costituisce non può dividersi, ma in tutti i processi in cui interviene si comporta come una unità, quasi come un corpicciolo: di qui il nome di granulo di energia.

Quando un'onda elettromagnetica investe un atomo, un suo elettrone può catturare un quanto e assorbirlo. L'energia dell'elettrone resterà allora aumentata e può essere che l'aumento di energia sia sufficiente solo a far passare l'elettrone da un'orbita a una più esterna; in questo caso l'elettrone girerà per un certo tempo su quest'orbita, ma poi tornerà spontaneamente a quella più interna, emettendo il quanto.

Può invece darsi che il quanto fornisca all'elettrone l'energia necessaria per uscire anche dall'orbita più esterna dell'atomo ed allontanarsi definitivamente dal nucleo (effetto fotoelettrico). Il verificarsi o no di questo caso dipende evidentemente dall'energia del quanto e dall'energia con cui l'elettrone è legato al nucleo; solo quando la prima sia maggiore della seconda l'elettrone sfugge dall'atomo.

Può infine accadere che un elettrone riesca a uscire dall'atomo senza assorbire il quanto (effetto Compton, dal nome del fisico americano ARTURO COMPTON che lo ha scoperto); in questo caso il quanto si comporta come un corpuscolo: esso ha urtato l'elettrone e lo ha messo in moto proprio come una palla da biliardo urtandone un'altra imprime a quest'ultima una certa velocità. I giuocatori di biliardo o di bocce sanno benissimo che quando una palla ne urta un'altra, essa cambia direzione e perde velocità; cioè perde energia, perchè ne ha ceduta una parte

alla palla che ha messo in moto. Analogamente anche il quanto, urtando l'elettrone, viene deviato e perde quella parte di energia necessaria all'elettrone per uscire dall'atomo.

La diminuzione di energia del quanto non deve intendersi come uno spezzamento di esso, ma come una diminuzione di frequenza delle onde che lo costituiscono. Se attribuiamo al quanto una individualità possiamo dire che dallo scontro con l'elettrone esso esce non mutilato, ma piuttosto un po' deperito per la violenza dell'urto.

Gli elettroni messi in moto dai quanti di energia, sia col meccanismo dell'effetto fotoelettrico, sia con quello dell'effetto COMPTON, possono avere, come abbiamo già detto, una energia sufficiente per produrre una ionizzazione dei gas nei quali si formano e che attraversano. Si comprende quindi come un apparecchio che segnala la presenza di corpuscoli possa registrare anche la presenza di raggi *gamma*: essi infatti liberano degli elettroni veloci all'interno dell'apparecchio e la loro presenza viene rivelata come quella degli elettroni di qualsiasi altra provenienza. Anche in una camera di WILSON è possibile in alcuni casi vedere delle deboli tracce che non provengono dalle pareti dell'apparecchio, ma nascono in un punto nell'interno di esso, indicando che in quel punto è avvenuta una interazione tra un quanto e un atomo, dalla quale è risultata la liberazione di un elettrone.

Tutto ciò che abbiamo detto per i raggi *gamma* vale naturalmente anche per i raggi X, data la loro identica natura (onde elettromagnetiche). Quindi in una camera di Wilson si potranno anche osservare tracce di elettroni secondari strappati da raggi X alle molecole del gas (tav. XII *a*).

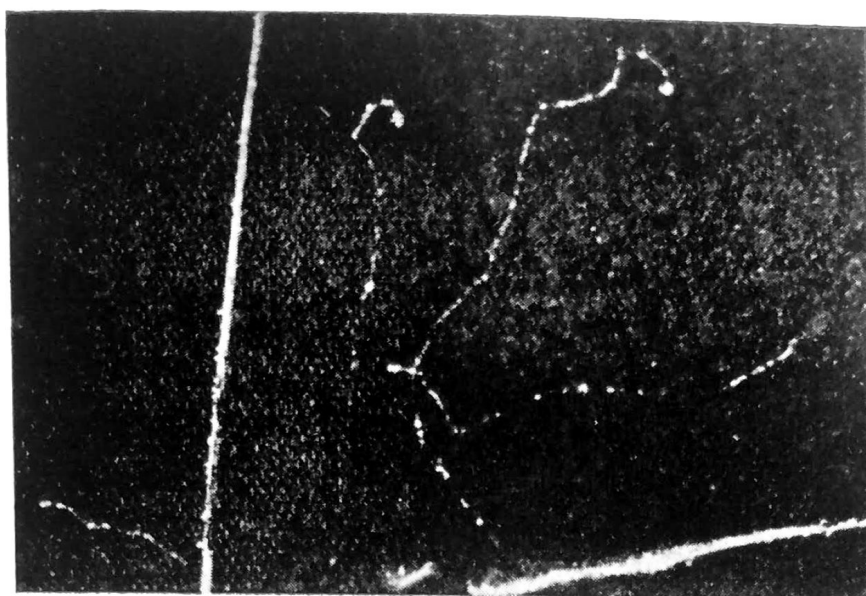
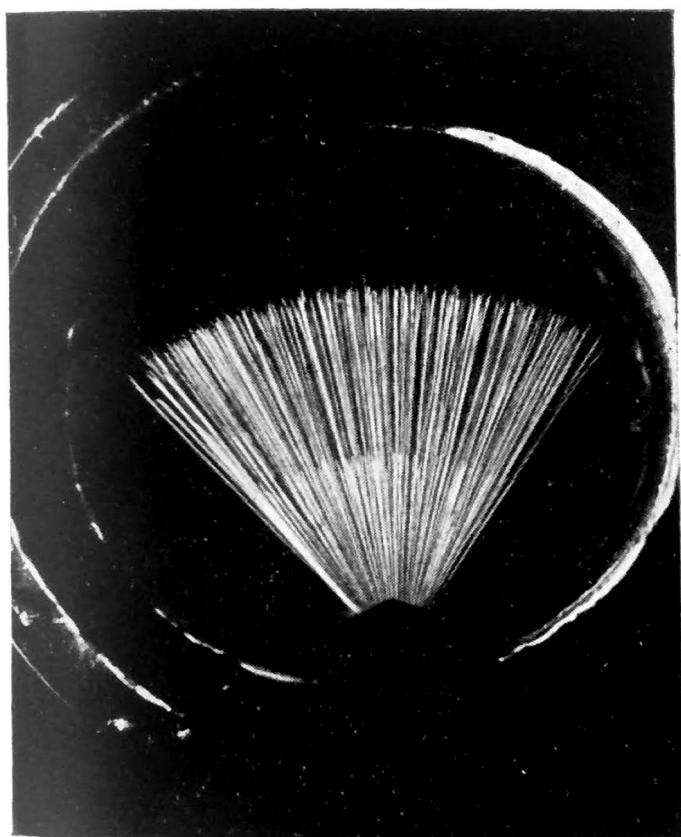
Capitolo VII

IL NUCLEO

Nella fisica dell'atomo si prescinde di solito dalla struttura del nucleo, considerando questo, data la sua estrema piccolezza, come un punto materiale. Questa descrizione, sufficiente per spiegare la maggior parte dei fenomeni atomici, è però certamente incompleta e la dimostrazione più convincente di questo fatto si ha nei fenomeni radioattivi, noti ormai da una cinquantina di anni. Essi consistono, come già si è visto, in una disintegrazione spontanea dei nuclei di alcuni elementi pesanti, i quali emettono elettroni e particelle *alfa* cioè nuclei di elio.

Vi è poi un altro fatto che, indipendentemente dai fenomeni radioattivi, ci induce ad assegnare al nucleo una struttura complessa: è noto che i pesi degli isotopi dei vari elementi sono, con grande approssimazione, multipli interi del peso dell'atomo di idrogeno; rammentiamo in particolare che il peso atomico dell'elio è 4, cioè eguale a 4 volte quello dell'idrogeno.

In base a queste considerazioni furono fatti vari tentativi per spiegare la struttura del nucleo; però solo dopo la scoperta di due nuove particelle si riuscì a costruire un modello nucleare del tutto soddisfacente, il quale permette di risolvere quasi tutti i problemi che riguardano la struttura del nucleo. Queste due nuove particelle sono il «neutrone» e l'«elettrone positivo» o «positrone». Prima dunque di passare a parlare della costituzione dei nuclei dei vari elementi dobbiamo dire qualcosa intorno alla scoperta ed alle caratteristiche di queste due particelle.

Già nel 1919 alcune esperienze fatte da Lord RUTHERFORD avevano dimostrato che è possibile spezzare artificialmente i nuclei di alcuni elementi leggeri, sottoponendo questi ultimi all'azione delle particelle *alfa* emesse con grande energia da una sostanza radioattiva. Nel linguaggio ormai abituale dei fisici, l'azione dei corpuscoli che vengono emessi con una certa energia, viene paragonata all'azione dei proiettili sparati da un cannone. Quando perciò questi corpuscoli investono una sostanza, si suole dire che essi la b o m b a r d a n o. Rutherford dunque bombardava gli elementi leggeri con particelle *alfa*; alcune poche di esse, investendo in pieno dei nuclei, li spezzavano e producevano l'emissione di corpuscoli che, come si riconobbe, erano protoni; essi hanno piccolo potere penetrante, perchè si arrestano completamente attraversando nei metalli spessori di frazioni di millimetro.

a) (da *Rutherford*)

b) (*Rasetti*) *c*) (*Curie* e *Joliot*)

FOTOGRAFIE IN CAMERA DI WILSON

a) Tracce di particelle alfa e beta.

b) Due gruppi di particelle alfa di diverso potere penetrante, provenienti da un preparato di torio C + torio C′

c) Traccia dovuta a un nucleo di azoto messo in moto da un neutrone invisibile.

Il problema di disintegrare artificialmente gli atomi era molto affascinante, e, come vedremo più estesamente in seguito, molti furono i fisici che si dettero a questo studio, non appena RUTHERFORD rese note le sue esperienze. Fra i molti lavori fatti a questo riguardo ha grande importanza, per la scoperta del neutrone, una esperienza eseguita nel 1931 dai fisici tedeschi BOTHE e BECKER. Essi volevano esaminare se la disintegrazione artificiale dei nuclei poteva essere accompagnata dall'emissione dei raggi *gamma*, in modo analogo al caso delle disintegrazioni radioattive. A questo scopo essi bombardavano con particelle *alfa* una certa quantità di berillio e circondavano questo e la sorgente radioattiva con uno strato di due millimetri di ottone, sufficiente a fermare le particelle *alfa* e gli eventuali protoni che si formassero dal berillio; invece gli eventuali raggi *gamma* avrebbero potuto attraversarlo ed essere rivelati per mezzo di un contatore a punta. Da questa esperienza risultò allora che il berillio bombardato con particelle *alfa* emetteva effettivamente una radiazione assai penetrante e BOTHE e BECKER, dopo averla esaminata, conclusero che si trattava di raggi *gamma* o di altra radiazione elettromagnetica di grande energia.

I coniugi IRÈNE CURIE (figlia di Madame Curie) e F. JOLIOT vollero allora ripetere l'esperienza con una camera di ionizzazione; essi però facevano variare il tipo di schermo che doveva fermare le particelle poco penetranti e si accorsero così che

quando questo schermo è costituito di una sostanza contenente idrogeno (acqua o paraffina), la corrente nella camera di ionizzazione aumenta moltissimo. Era logico pensare che i raggi *gamma*, nel passare attraverso lo schermo, riuscissero non solo a ionizzare degli atomi di idrogeno, ma anche a mettere in moto i protoni così formati. Questo effetto non si poteva osservare con schermi metallici poichè gli atomi dei metalli sono assai più pesanti di quelli dell'idrogeno e molto più difficilmente possono venir messi in moto.

A prima vista questa spiegazione potrebbe sembrare soddisfacente. Quando però si vada ad esaminare la cosa più da vicino, e si facciano i calcoli necessari, si vede che una radiazione elettromagnetica dovrebbe avere un'energia inverosimilmente grande, per riuscire a mettere in moto dei protoni e imprimere loro la velocità riscontrata nell'esperienza. I coniugi JOLIOT, non vedendo una soluzione plausibile del problema, pubblicarono i risultati dei loro lavori e le difficoltà davanti alle quali si trovavano.

Spetta all'inglese JAMES CHADWICK il merito di aver compreso come stessero le cose, sia nell'esperienza di BOTHE che in quella dei JOLIOT. Il CHADWICK riprese nel 1932 questi esperimenti, nel *Cavendish Laboratory* di Cambridge, ed ebbe dei risultati ancora più inconciliabili con l'ipotesi che la radiazione penetrante emessa dal berillio fosse tutta di natura elettromagnetica: risultò

infatti che questa radiazione era capace di conferire grandi velocità anche a nuclei di altri elementi di massa non troppo grande.

Dai dati forniti da questo complesso di lavori, il Chadwick dedusse che i protoni e gli altri nuclei non sono messi in moto da radiazioni elettromagnetiche, ma da una nuova radiazione costituita di particelle materiali, che non portano alcuna carica elettrica e che hanno massa quasi uguale a quella del protone. A questi corpuscoli è stato dato il nome di neutroni appunto per il fatto di essere elettricamente neutri. Il berillio bombardato con particelle *alfa* non emette protoni ma neutroni e raggi *gamma*, ed erano questi ultimi che si rivelavano nell'esperienza di Bothe e Becker, entrando nel contatore a punta.

Le caratteristiche dei neutroni, e in particolare la capacità di attraversare spessori abbastanza grandi di materia, dipendono soprattutto dalla loro mancanza di carica elettrica. Quando una particella carica, per esempio una particella *alfa*, attraversa la materia, essa esercita sopra un elettrone, anche a distanza, delle forze di attrazione di natura elettrica, nello stesso modo come una calamita attira anche da una certa distanza la limatura di ferro. Quando poi una particella passa non troppo lontano da un nucleo, esercita pure su questo delle forze elettriche, le quali però in questo caso sono repulsive. Si può quasi dire che la particella *alfa* urta anche da lontano degli elet-

troni, e in assai minor numero anche dei nuclei. Il frenamento che le particelle *alfa* subiscono nell'attraversare la materia è dovuto a questi urti elettrici.

I neutroni invece, poichè non portano carica, non risentono affatto dell'azione delle forze elettriche: essi passano attraverso alla materia come un bolide nell'aria, nè restano frenati se urtano un elettrone, il quale ha massa estremamente piccola; ma solo li rallenta l'urto effettivo contro un nucleo. In conseguenza di questi fatti il potere penetrante dei neutroni è circa diecimila volte più grande di quello delle particelle *alfa*.

Vedremo in seguito che il fatto di essere neutri rende i neutroni molto efficaci come agenti per produrre disintegrazioni artificiali di nuclei: se infatti si lanciano contro ai nuclei da disintegrare dei protoni o delle particelle *alfa*, le forze repulsive esercitate su di essi dalla carica positiva dei nuclei, ostacolano il loro avvicinamento; i neutroni invece, non avendo carica elettrica, non vengono respinti e giungono indisturbati fino al nucleo.

L'elettrone positivo o positrone, fu scoperto sperimentalmente nel 1933, durante ricerche sulla radiazione cosmica (o penetrante). L'americano C. D. ANDERSON eseguiva esperienze per determinare l'energia cinetica dei

corpuscoli di origine cosmica, e a questo scopo osservava le loro traiettorie in una camera di WILSON, nella quale era stabilito un campo magnetico. L'effetto del campo magnetico è di incurvare il percorso di una particella carica, (tav. XII *b*) tanto più quanto minore è l'energia della particella: si comprende quindi come ANDERSON, dall'incurvamento della traiettoria dei corpuscoli cosmici potesse risalire all'energia di questi. D'altra parte un campo magnetico fletterà in un verso i corpuscoli carichi positivamente e in verso opposto quelli carichi negativamente.

Ebbene, ANDERSON si accorse che non tutte le traiettorie erano curvate nel senso corrispondente a cariche negative (elettroni) ma che alcune erano incurvate in senso opposto, indicando così la presenza di particelle cariche positivamente (tav. XIII *a*, *b*). Egli credette, in un primo tempo, che i corpuscoli positivi fossero protoni di grandissima energia, ma proseguendo le sue esperienze trovò che una parte dei corpuscoli positivi avevano una massa minore di quella del protone e prossima a quella dell'elettrone; essi costituivano un nuovo tipo di corpuscoli che furono chiamati elettroni positivi.

Quasi contemporaneamente ad ANDERSON, sempre nel 1933, l'inglese P. M. S. BLACKETT e l'italiano GIUSEPPE OCCHIALINI, eseguirono in questo campo brillantissime esperienze. Usando un ingegnoso dispositivo per poter fare con la camera di WILSON un gran numero di fotografie dei

corpuscoli prodotti dalla radiazione penetrante, questi fisici riuscirono a fotografare complicatissimi fenomeni nei quali da uno stesso punto (in cui probabilmente è avvenuta una violenta disintegrazione nucleare) si vedono irradiare qualche diecina di tracce di corpuscoli animati da alte velocità ("showers"). Se il fenomeno si osserva ponendo la camera di WILSON in un campo magnetico, si può riconoscere che alcune di queste tracce sono dovute a comuni elettroni negativi, mentre altre deviano in verso tale da doversi attribuire a elettroni positivi (tav. XIII *c*).

Dopo la scoperta del positrone, la sua presenza fu riconosciuta non solo in fenomeni dovuti ai raggi cosmici, ma anche in altri fenomeni realizzabili in laboratorio e che quindi si possono produrre artificialmente; fu scoperto in particolare che sotto l'azione dei raggi *gamma* di grande energia gli elementi di peso atomico elevato emettono delle coppie costituite da un elettrone positivo e da uno negativo (vedi tavola XVII, *b*). In questo caso assistiamo a un vero e proprio processo di materializzazione dell'energia raggiante, poichè una piccola quantità di essa sparisce e al suo posto si formano dei corpuscoli materiali (coppie di un elettrone positivo e uno negativo); per questa ragione gli elettroni e i positroni che si sono formati a spese dell'energia raggiante vengono chiamati «elettroni di materializzazione», secondo la proposta di Madame CURIE. Un pro-

cesso opposto a questo provoca la dematerializzazione di corpuscoli: quando un elettrone positivo e uno negativo si incontrano, essi possono talvolta distruggersi a vicenda, e dalla loro distruzione prende origine dell'energia raggiante.

La scoperta sperimentale del positrone costituisce un trionfo per la fisica teorica: infatti l'esistenza del positrone era stata prevista dal fisico P. A. M. Dirac come conseguenza della sua teoria quantistica relativistica dell'elettrone. Secondo questa teoria, oltre ai normali stati quantici, dovevano esistere per l'elettrone anche degli stati quantici che non avevano apparentemente nessuna corrispondenza fisica, in cui l'elettrone avrebbe avuto una energia cinetica negativa. Dirac propose allora di ammettere che tutti questi stati anomali fossero occupati in modo da riempire uniformemente tutto lo spazio; essi non sarebbero osservabili appunto per la loro uniformità. Se però venisse a mancare, per una qualsiasi ragione, un elettrone da uno di questi stati negativi, si verrebbe a notare la sua mancanza e cioè una *lacuna*; Dirac dimostrò che una di queste lacune si comporterebbe in tutto e per tutto come un corpuscolo positivo. Però non si sapeva, da principio, quale potesse essere il corpuscolo positivo, con cui una di queste lacune doveva identificarsi: infatti il protone, pur essendo la particella carica positivamente di massa più leggera, conosciuta fino ad allora, era sempre enormemente

più pesante dell'elettrone; si credette dunque in un primo tempo che le lacune di Dirac non avessero corrispondenza reale. La scoperta dell'elettrone positivo, che ha tutte le proprietà previste per le lacune, ci ha dimostrato che la teoria di Dirac era esatta. Questa teoria ci spiega inoltre la formazione simultanea di una coppia elettrone-positrone: estraendo infatti un elettrone da uno stato di energia negativa e portandolo in uno stato di energia positiva si crea contemporaneamente una lacuna (positrone) e un elettrone comune.

Questa brillante teoria quantistica dell'elettrone fruttò al suo ideatore il premio Nobel per la fisica (1933).

Torniamo ora al problema della struttura del nucleo ed osserviamo subito che mentre fino al 1932 conoscevamo solo due particelle indivisibili (o per lo meno di cui non si può fino ad oggi prevedere una ulteriore divisibilità) e cioè il protone e l'elettrone, ora se ne conoscono 4: *protone*, *elettrone*, *neutrone* e *positrone*. Mentre dunque, fino a pochissimo tempo fa i mattoni a nostra disposizione per costruire tutti i tipi di nuclei erano solo di due specie, possiamo ora scegliere fra 4 qualità di materiali da costruzione, e le cose si fanno quindi più complicate.

L'ipotesi più soddisfacente, che ha trovato conferma in molte esperienze e che quindi è oggi da tutti accettata, suppone i vari nuclei costituiti da protoni e neutroni, cioè da due tipi di particelle di massa eguale, le une cariche positivamente, le altre neutre.

Rammentiamo che un protone ha massa 1 e carica 1, un neutrone ha massa 1 e carica zero. Perciò tutta la carica di un nucleo è necessariamente dovuta ai soli protoni: se un nucleo ha per esempio carica 4 vuol dire che in esso sono contenuti 4 protoni. La massa di un nucleo è invece dovuta sia ai protoni che ai neutroni e quindi se un nucleo ha massa 8, vuol dire che il numero complessivo dei neutroni e dei protoni è 8.

Vediamo allora come possa essere costituito un nucleo qualsiasi, per esempio un nucleo di alluminio; l'alluminio ha numero atomico 13 e peso atomico 27. Poichè il numero atomico coincide con la carica nucleare, il nucleo di alluminio ha carica 13 e, per quanto si è detto, deve contenere 13 protoni. D'altra parte il numero complessivo di protoni e di neutroni è eguale al peso atomico 27, e quindi il numero dei neutroni è $27 - 13 = 14$; concludiamo che il nucleo di alluminio è costituito di 13 protoni e di 14 neutroni. Analogamente si potrebbe procedere per conoscere il numero dei protoni e dei neutroni nucleari di tutti gli elementi: il numero atomico Z ci dà il numero dei protoni, la differenza A-Z tra il peso ato-

mico e il numero Z dei protoni ci indica il numero dei neutroni.

In particolare il nucleo dell'idrogeno, che ha peso atomico 1 e numero atomico 1, è costituito da un sol protone e da nessun neutrone. Esiste poi anche un nucleo che fu scoperto solo nel 1932, dall'americano UREY e collaboratori; esso ha ancora numero atomico 1 come l'idrogeno, del quale è quindi un isotopo; il suo peso atomico è però 2 ed esso è dunque costituito da un protone e da un neutrone. A questo semplicissimo aggregato nucleare è stato dato il nome di « deutone ». Notiamo che prima della scoperta del deutone, l'aggregato nucleare più semplice era quello dell'elio, nel quale però già intervengono 4 particelle (due neutroni e due protoni). Si comprende quindi l'importanza che può avere nello studio delle forze che tengono legati i costituenti del nucleo, l'avere a disposizione un nucleo, in cui, essendo due soli i costituenti che interagiscono, possono restar molto semplificati i relativi calcoli. Il deutone si è anche mostrato efficace come proiettile in alcune disintegrazioni artificiali.

Mentre 92 sono gli elementi chimicamente distinti, esistenti in natura, i diversi tipi di atomi raggiungono un numero molto superiore, poichè, come abbiamo visto, quasi per ogni elemento

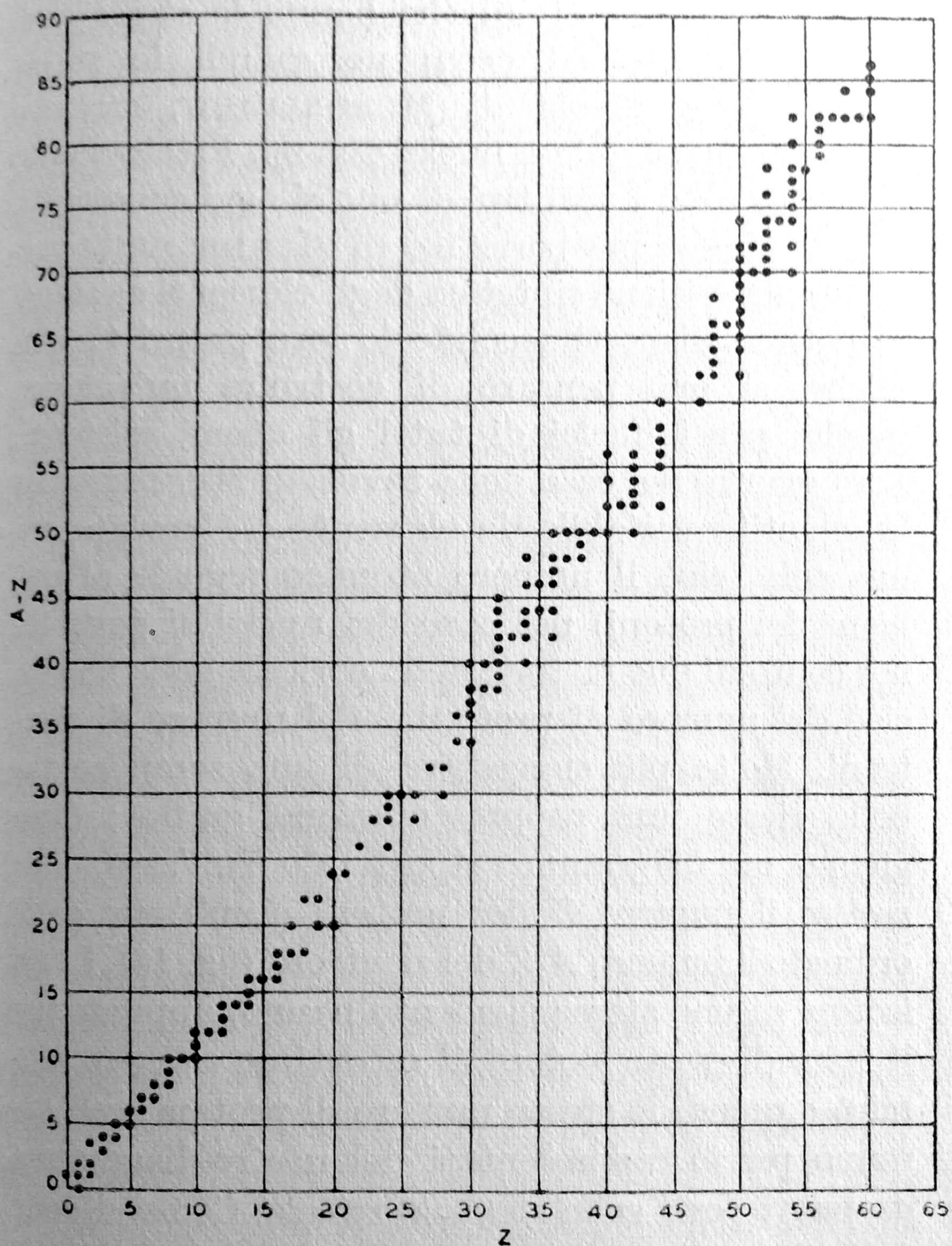



Fig. 14. - Diagramma dei nuclei in funzione del loro numero di protoni (Z) e di neutroni (A-Z).

esistono due, tre o anche più isotopi: vi sono cioè specie diverse di atomi che hanno le stesse proprietà chimiche ed occupano quindi la stessa casella della tavola di MENDELEJEW, ma che hanno massa, e quindi nuclei diversi. Precisamente circa 250 sono i vari tipi di nuclei oggi conosciuti.

Come il sistema periodico di MENDELEJEW permette una visione sintetica degli elementi esistenti in natura, disposti secondo le loro proprietà chimiche, si può pensare di costruire un'analoga tabella per i nuclei di tutti gli atomi esistenti. Però mentre nel caso della tavola di MENDELEJEW la quantità variabile da elemento a elemento era una sola, cioè il numero atomico (eguale al numero dei protoni) nel caso dei nuclei si deve tener conto di due fattori: della carica e della massa, cioè del numero di protoni e del numero di neutroni. Molto più suggestiva di una semplice tabella riesce una rappresentazione grafica; disegnamo un diagramma riportando sull'asse delle ascisse il numero Z dei protoni e sull'asse delle ordinate il numero A-Z dei neutroni (fig. 14). I vari isotopi di uno stesso elemento hanno, appunto per il fatto di essere isotopi, il medesimo numero atomico e quindi lo stesso numero di protoni; essi saranno perciò rappresentati nel nostro diagramma da punti posti sulla stessa verticale. Come si vede dalla figura i punti rappresentativi dei nuclei dei vari elementi esistenti in natura si raggruppano lungo una striscia quasi rettilinea che esce a quarantacinque gradi dall'origine.

Come la teoria dell'atomo rende perfettamente conto della distribuzione dei vari atomi nella tavola di MENDELEJEW, così una teoria del nucleo dovrà rendere conto, almeno in generale, del diagramma protoni-neutroni ora disegnato. Ebbene il fisico tedesco WERNER HEISENBERG, a cui nel 1932 fu assegnato il premio Nobel per la fisica, pose tre anni or sono le basi di una teoria del nucleo, modificata poi in parte dall'italiano ETTORE MAJORANA, la quale permette di giustificare, nelle sue linee generali, il grafico prima disegnato.

In questa teoria si fanno delle ipotesi sul tipo di forze che agiscono tra i protoni e i neutroni del nucleo. Supponiamo per un momento che tra queste particelle agiscano soltanto le forze elettrostatiche, cioè le forze dovute alle loro cariche elettriche. I protoni allora, per il fatto di essere tutti carichi positivamente, si respingeranno, e i neutroni, per il fatto di essere elettricamente neutri, non eserciteranno nè verso i protoni nè tra loro alcuna forza. Quindi, in definitiva, essendo repulsiva l'unica forza che agisce tra i costituenti del nucleo, questo tenderà a disintegrarsi ed i protoni e i neutroni a disperdersi nel vuoto.

Poichè ciò non avviene, deve esistere nel nucleo un'altra forza di tipo coesivo, la quale abbia, per i nuclei stabili, un valore che sia superiore a quello delle forze elettrostatiche repulsive, in

modo da avere il sopravvento su queste. Grazie a questa nuova forza i protoni e i neutroni costituenti il nucleo potranno restare riuniti insieme. E precisamente l'idea fondamentale della teoria di HEISENBERG-MAJORANA consiste nel suggerire un determinato tipo di forza di interazione fra protoni e neutroni, la quale, insieme alla forza elettrostatica di repulsione che si esercita fra protoni, determina la stabilità o meno di un nucleo atomico.

Poichè tra le particelle nucleari esiste questa forza di legame, dovremo spendere una certa energia per vincere questa forza, se vogliamo disgregare il nucleo, cioè allontanare uno dall'altro i protoni e i neutroni. Vediamo come si può *a priori* conoscere per ogni nucleo il valore di questa energia, la quale si chiama energia di legame.

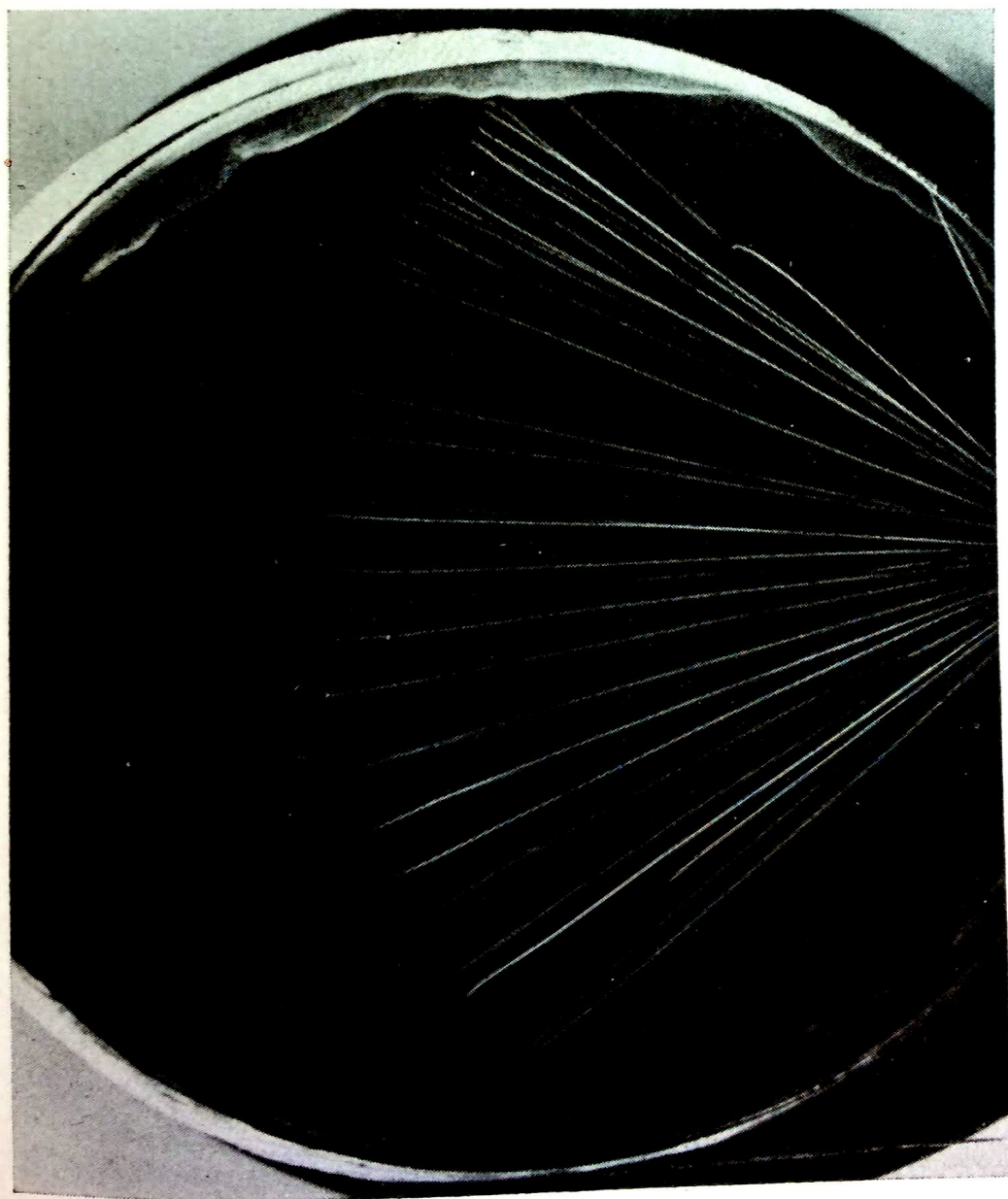
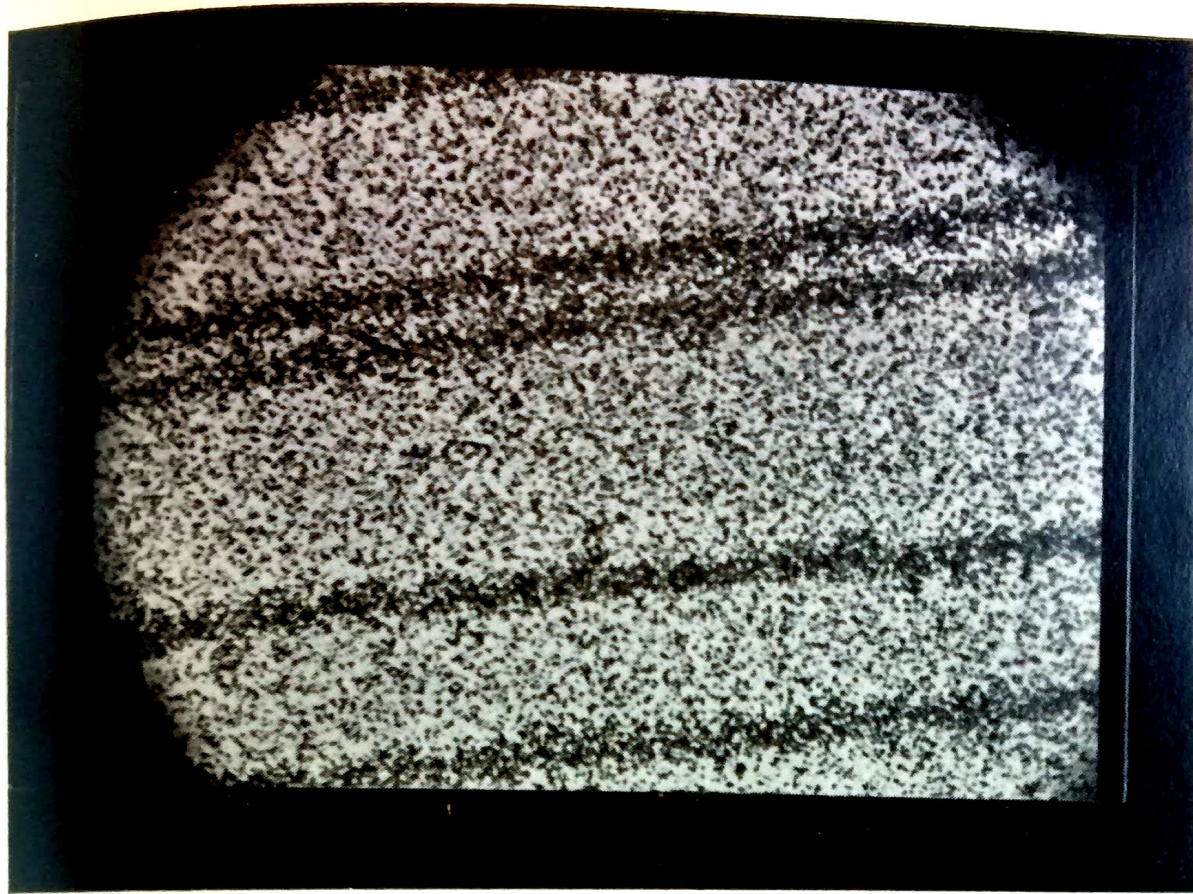
Supponiamo che un certo numero di protoni e di neutroni siano uniti insieme in un nucleo atomico; e siano per esempio Z i protoni e N i neutroni; andando a misurare la massa totale di questo nucleo troveremo che essa non è eguale alla somma delle masse degli Z protoni e degli N neutroni, come ci si aspettava: la massa nucleare è leggermente inferiore al valore di questa somma. La differenza tra questo valore e il valore della massa effettiva del nucleo prende il nome di « difetto di massa » e costituisce l'energia di legame che impedisce alle particelle di disperdersi. Dicendo « la differenza di massa costituisce l'energia », non abbiamo che applicato il principio

di EINSTEIN della equivalenza tra energia e massa: secondo questo principio una massa m equivale a una energia mc^2 (essendo c la velocità della luce nel vuoto, uguale a 300.000 km al secondo) ed una energia E equivale a una massa $\frac{E}{c^2}$, qualunque sia la forma sotto cui si presenta questa energia (di moto, luminosa, ecc. . . .).

I fenomeni radioattivi consistono, come abbiamo visto, nella disintegrazione spontanea di alcuni nuclei di elementi pesanti, i quali emettono con grande velocità particelle *alfa* e *beta* e si trasformano in nuovi nuclei.

L'esistenza di particelle *alfa* nel nucleo non è affatto contraria al nostro modello di nucleo costituito da protoni e neutroni; una particella *alfa* infatti (massa 4, carica 2) non è che un nucleo di elio, costituito da due neutroni e due protoni. Il fatto quindi che da un elemento vengono emesse particelle *alfa*, indica solo che alcuni protoni e alcuni neutroni sono nel nucleo più strettamente uniti a formare particelle *alfa*.

Per spiegare l'espulsione dal nucleo di una particella *alfa* il fisico russo G. GAMOW ha costruito una teoria, oggi universalmente accettata; prima però di esporla per sommi capi, osserviamo che una particella *alfa* è, come il nucleo, carica positivamente; se quindi tra questi due corpuscoli

agissero sempre soltanto le forze dovute alla loro carica elettrica, una particella *alfa* non potrebbe penetrare nel nucleo, perchè sarebbe respinta da questo con una forza tanto maggiore quanto più vicini sono i due corpuscoli: in generale infatti due corpi che hanno carica elettrica dello stesso segno, seguono la legge di COULOMB, secondo la quale i due corpi si respingono con una forza che è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Nella teoria di GAMOW si ammette che, fin quando la particella *alfa* è all'esterno del nucleo, sia respinta da questo in conformità della legge di COULOMB, e che invece all'interno del nucleo agiscano delle forze attrattive, necessarie per giustificare il fatto che le particelle *alfa* possono trattenersi per lungo tempo nell'interno del nucleo. Volendo rappresentare graficamente come varia la forza repulsiva che agisce sulla particella *alfa*, man mano che questa procede da molto lontano fin nell'interno del nucleo, dobbiamo riportare sull'asse delle ascisse la distanza r della particella dal centro del nucleo (fig. 15) e sull'asse delle ordinate il valore della forza agente; il diagramma risultante sarà quello della figura: infatti da questo si vede che, fino a quando la particella *alfa* è molto lontana dal nucleo (r molto grande) la forza repulsiva è quasi nulla; man mano che la particella si avvicina, questa forza aumenta: quando però essa è a una distanza dal centro del nucleo eguale al raggio nucleare R,

a) (*Rasetti*) *b*)

FOTOGRAFIE IN CAMERA DI WILSON

a) Tracce di particelle alfa provenienti da una sorgente radioattiva. La pressione nella camera è ridotta in modo da avere tracce più lunghe; *b*) Tracce di particelle alfa fortemente ingrandite.

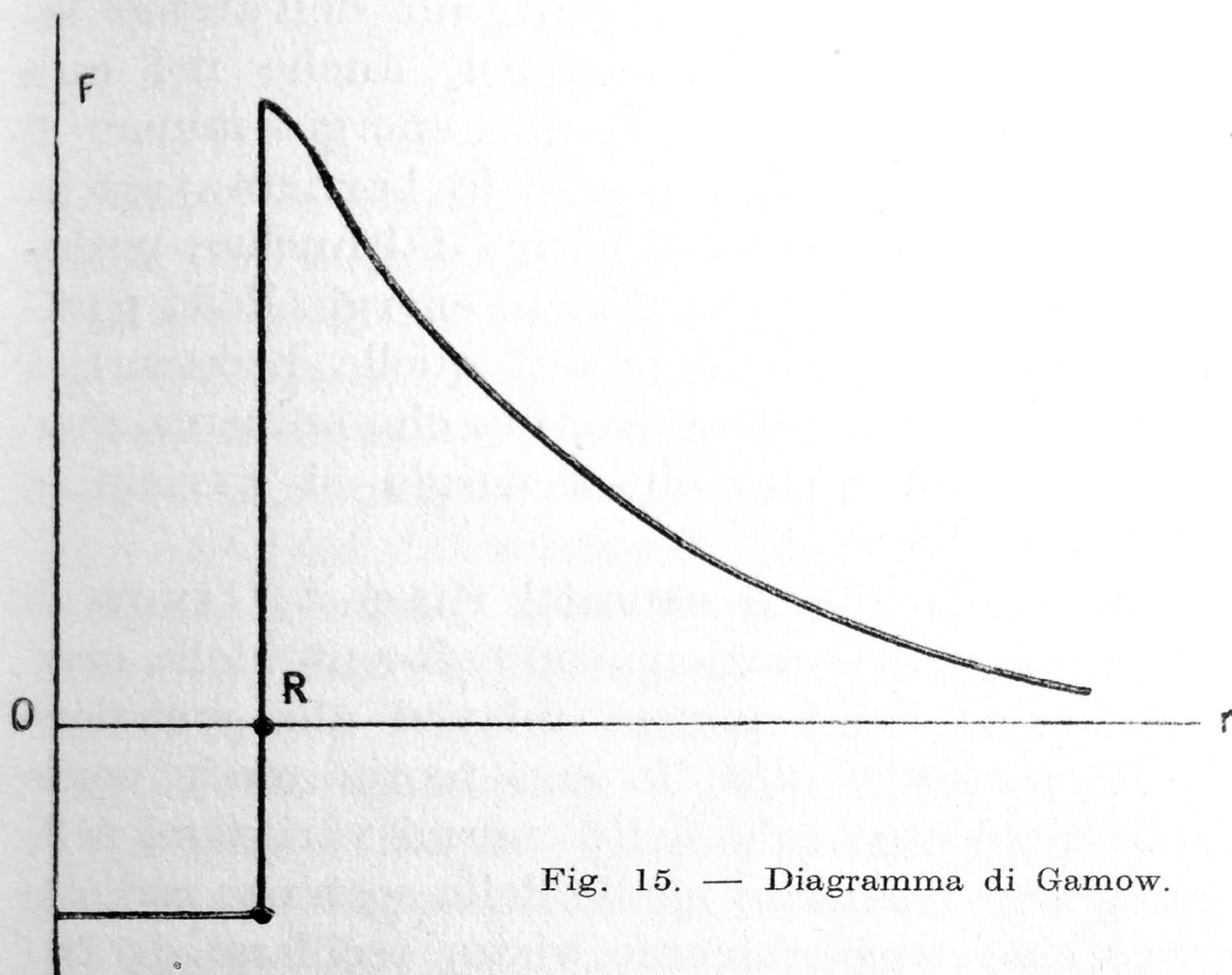



Fig. 15. — Diagramma di Gamow.

la forza passa bruscamente ad un valore negativo, cioè nel momento in cui la particella entra nel nucleo, la forza da repulsiva diventa attrattiva. Se quindi una particella che si trovi all'interno del nucleo vuole uscirne, dovrebbe poterci riuscire soltanto se possiede una energia sufficiente a vincere le forze attrattive che agiscono su essa nell'interno del nucleo; non appena però essa avrà superato questa specie di barriera che la trattiene all'interno, verrà respinta con una forza che, grandissima in principio, va diminuendo man mano che essa si allontana, seguendo la legge di repulsione elettrostatica di Coulomb. Secondo la meccanica ondulatoria, che, come

abbiamo visto, vale nell'interno dell'atomo invece della meccanica classica, anche nel caso in cui la particella abbia una energia minore di quella necessaria a superare la barriera, essa ha una certa probabilità di uscire dal nucleo; probabilità che è molto piccola se l'energia della particella *alfa* è molto minore di quella necessaria a vincere le forze attrattive, ma che aumenta sempre più man mano che l'energia si avvicina a questo valore.

In base a questi concetti riuscì a GAMOW di dare una interpretazione soddisfacente della maggior parte dei fenomeni relativi alla emissione delle particelle *alfa*; la sua teoria rende conto perfettamente anche delle enormi variazioni nelle lunghezze delle vite medie delle sostanze radioattive che, come abbiamo visto, oscillano da frazioni piccolissime di secondo a molti milioni di anni e del fatto che le sostanze a vita media più breve emettono particelle *alfa* di maggior energia e quindi più veloci.

Anche l'emissione dei raggi *gamma* si può spiegare con la teoria di GAMOW: bisogna però ammettere che le particelle *alfa* nell'interno del nucleo si trovino in stati quantici analoghi a quelli degli elettroni nell'atomo. Il passaggio di una particella *alfa*, da uno stato quantico a un altro, produrrebbe l'emissione di raggi *gamma*, come il passaggio di un elettrone da uno stato quantico a uno inferiore produce l'emissione di altre radiazioni elettromagnetiche.

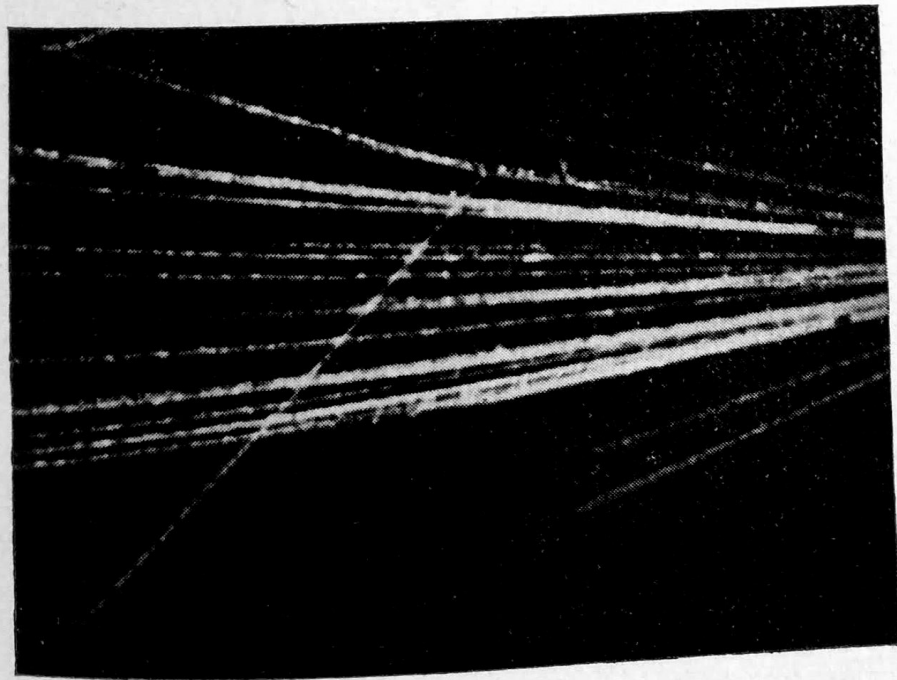
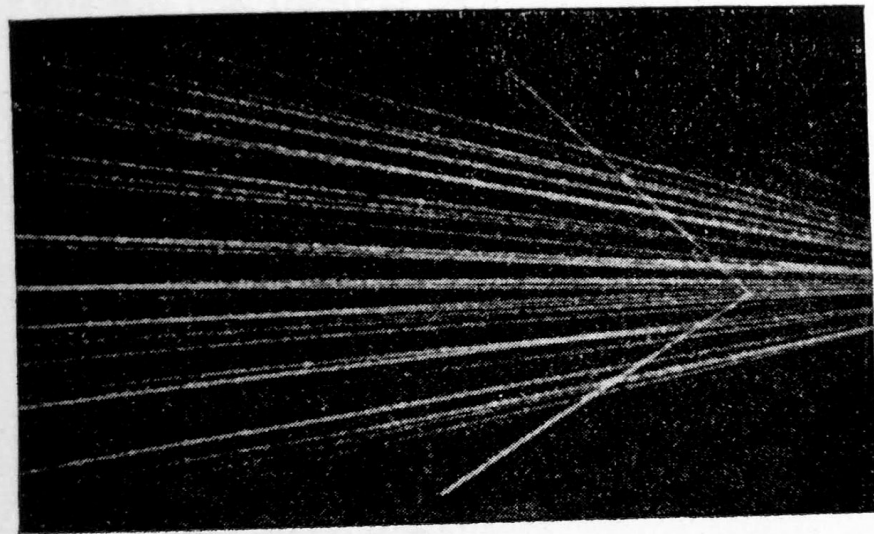
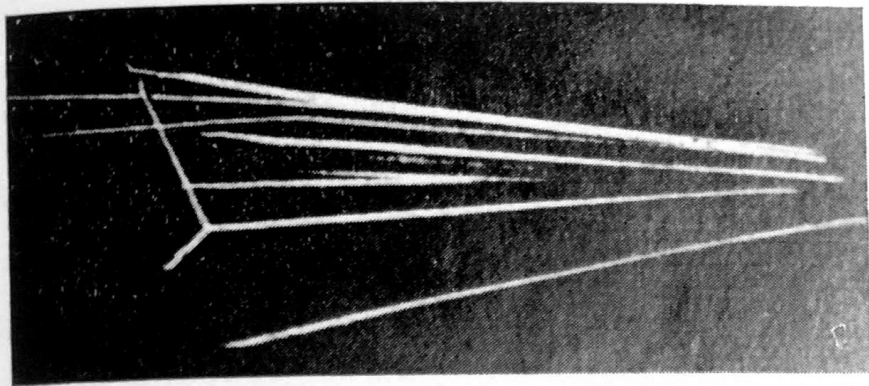
***

Mentre la teoria di GAMOW rende molto bene conto dell'emissione delle particelle *alfa* e dei raggi *gamma*, non esiste fino ad oggi nessuna teoria completa per la emissione delle particelle *beta*. La prima difficoltà che si presenta è la seguente: come si può spiegare che i nuclei radioattivi espellano elettroni dal momento che i corpuscoli costituenti il nucleo sono soltanto i neutroni e i protoni? Come si può spiegare cioè il fatto che da un nucleo vengano emesse particelle che non sono in esso contenute?

Un'altra difficoltà è data dalla seguente osservazione: supponiamo di prendere 100 atomi di uranio X_1: questo si disintegra emettendo particelle *beta*, e dando luogo a uranio X_2; poichè gli atomi di partenza e quelli di arrivo hanno energie determinate, ci si aspetterebbe che anche le particelle emesse avessero energia di un solo valore, determinata dalla differenza di energia dei nuclei di partenza e di arrivo; si trova invece che queste particelle hanno energie di tutti i valori possibili, fino a un valore massimo.

Per spiegare questa seconda difficoltà il fisico PAULI ha avanzata l'ipotesi dell'esistenza di una nuova particella elementare, «il neutrino», corpuscolo elettricamente neutro, di massa ancora più piccola dell'elettrone. Supponiamo allora che

l'uranio emetta contemporaneamente ad una particella *beta* anche un neutrino: la differenza di energia tra il nucleo di uranio X_1 di partenza e quello di uranio X_2 di arrivo si dividerà tra l'elettrone e il neutrino in un modo qualunque, cosicchè avremo tante coppie di elettroni e neutrini di tutte le possibili energie, tali però che la somma delle energie del neutrino e dell'elettrone sia sempre uguale alla differenza tra le energie dei nuclei di partenza e di arrivo. In definitiva poi, dato che i neutrini, a causa della loro neutralità elettrica e della piccolissima massa sfuggono oggi a ogni attuale metodo di osservazione, noi osserveremo soltanto, come emessi dall'uranio X_1 elettroni di tutte le possibili energie.

Basandosi sull'ipotesi di PAULI il fisico italiano ENRICO FERMI ha costruito una teoria che costituisce un tentativo per spiegare anche la prima delle due difficoltà alle quali abbiamo accennato: come mai il nucleo che è formato di soli neutroni e protoni può emettere degli elettroni? Poichè gli elettroni non entrano come costituenti nel nucleo, e poichè d'altra parte vengono emessi dalle sostanze radioattive è logico pensare che essi si creino, per così dire, all'istante in cui vengono emessi. Il processo ha una certa analogia formale con l'emissione di un quanto di luce da parte di un atomo. Come abbiamo visto, quando in un atomo un elettrone esterno passa da un'orbita a un'altra di minor energia, si ha emissione di un quanto di luce; questo dunque non esiste come

a) *b)* *c)* (da *Blackett*)

Tre casi di urti fra particelle alfa e nuclei

a) Urto contro un nucleo di idrogeno; *b)* Urto contro un nucleo di elio; *c)* Urto contro un nucleo di ossigeno.

tale nell'interno dell'atomo, ma si crea nell'istante in cui viene emesso. Nella teoria di FERMI si suppone che nell'interno di un nucleo un neutrone possa trasformarsi in un protone: neutrone e protone non sarebbero che due stati quantici diversi della stessa particella pesante, e in seguito al passaggio da uno stato all'altro, cioè alla trasformazione da neutrone a protone, verrebbe emessa una coppia elettrone-neutrino, pur non preesistendo nel nucleo. Come vedremo in seguito si ha, in alcuni casi, emissione da parte di sostanze radioattive artificiali di elettroni positivi: secondo la teoria di FERMI questa emissione di positroni si può interpretare come dovuta a un processo inverso a quello precedente, cioè alla trasformazione di un protone in neutrone.

In base a questa teoria si possono spiegare molte caratteristiche dell'emissione dei raggi *beta* dai nuclei.

Dai nuclei radioattivi possono dunque venir fuori delle particelle materiali che non sono contenute in essi: anche i prestigiatori fanno uscire dai bussolotti degli oggetti che prima non vi erano; però in questi casi c'è sempre un trucco e i bussolotti hanno in genere un doppio fondo. La natura è invece un prestigiatore assai più abile poichè può estrarre dai nuclei degli elettroni, dei positroni e dei neutrini che prima non esistevano, senza bisogno di trucchi o di doppi fondi.

Capitolo VIII

LE TRASMUTAZIONI ARTIFICIALI DEI NUCLEI

Fino a pochi anni fa i processi di modificazione del nucleo atomico, che costituiscono la radioattività, si producevano soltanto spontaneamente e soltanto in alcuni pochi elementi chimici. L'uomo poteva solo assistere al loro svolgimento, senza poterne nè accelerare nè ritardare l'andamento; le più forti pressioni, le temperature più elevate, le più violente reazioni chimiche, le correnti elettriche, le scariche.... niente aveva potuto trasmutare artificialmente un elemento in un altro, poichè anche i mezzi più potenti che l'uomo aveva a sua disposizione agivano soltanto sugli elettroni esterni di un atomo e proprio il nucleo atomico, vale a dire proprio ciò che varia passando da un elemento a un altro, restava inalterato, ben protetto dalla nuvola degli elettroni satelliti. Il tentativo degli alchimisti medioevali, di fabbricare l'oro scaldando diversi metalli, tradotto nel linguaggio della fisica moderna, era un tentativo di modificare il nucleo usando procedimenti che agiscono

soltanto sugli elettroni; gli alchimisti non avevano quindi maggiore probabilità di riuscita di quanta ne potrebbe avere un ingegnere minerario, il quale volesse raggiungere il centro della terra applicando i procedimenti che si usano di solito per scavare dei pozzi.

Per poter produrre delle modificazioni nei nuclei, e provocare, secondo il desiderio degli alchimisti, la formazione di un elemento da un altro, si sarebbe dovuto cercare un mezzo per attraversare l'atmosfera elettronica e arrivare al nucleo. Si esaminò allora se non sarebbe stato possibile trovare dei p r o i e t t i l i animati da sufficiente energia per non lasciarsi deviare dalle cariche degli elettroni e del nucleo stesso e che al momento dell'urto contro i nuclei, conservassero ancora una energia abbastanza grande per spezzarli; e si giunse così alla conclusione che le particelle *alfa* emesse dalle sostanze radioattive, a causa della loro massa e della enorme velocità di cui sono animate, dovessero costituire degli ottimi proiettili per bombardare altri nuclei ed alterarne la struttura.

Nel 1919 il fisico inglese ERNESTO RUTHERFORD, al quale in seguito per meriti scientifici è stato dato il titolo di Lord, per primo si servì delle particelle *alfa* per bombardare dei gas fra i quali l'azoto, o dei solidi in piccole lamine come l'alluminio, con la speranza che il proiettile, raggiungendo il nucleo dell'atomo bombardato, ne deter-

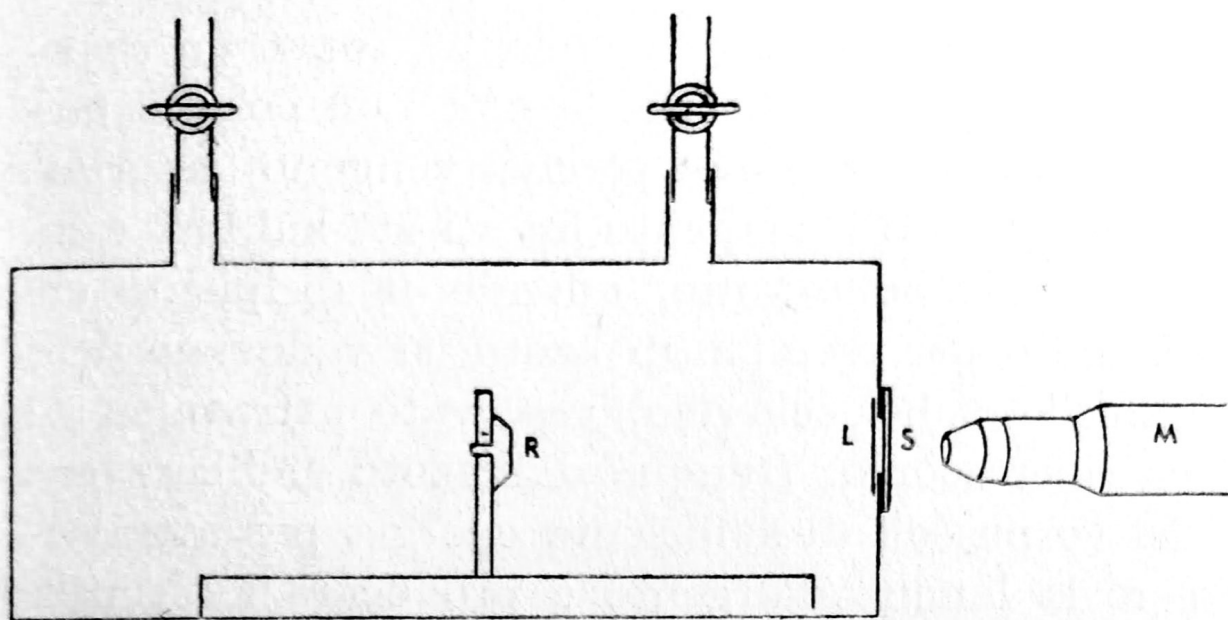



Fig. 16. — Apparecchio col quale Lord Rutherford produsse e mise in evidenza le prime disintegrazioni nucleari.

minasse la rottura e quindi la trasformazione in un nucleo di un atomo di natura diversa. Naturalmente, poichè non esiste alcun metodo di puntamento, bisogna sparare alla cieca e molti proiettili vanno perduti; tuttavia ve ne sono alcuni che colpiscono in pieno centro e fanno esplodere il nucleo toccato.

L'apparecchio usato da Lord RUTHERFORD è schematizzato nella figura 16. Esso consiste in un recipiente il quale può venir riempito del gas da esaminare attraverso due rubinetti; sopra una delle pareti del recipiente è praticato un foro, chiuso dall'interno con una laminetta d'argento, e in corrispondenza di esso vien posto, al di fuori dell'apparecchio, un piccolo schermo di vetro ricoperto di solfuro di zinco. La sorgente delle particelle *alfa*, consistente in un granulo di radio,

viene posta dentro al recipiente, sopra un apposito sostegno; le particelle *alfa* non possono raggiungere lo schermo perchè vengono assorbite dalla laminetta d'argento interposta sul loro cammino. Ciò nonostante, quando il recipiente era riempito per esempio di azoto, si vedevano delle scintille sullo schermo, osservato attraverso ad un microscopio. Dunque dall'azoto si liberavano dei corpuscoli di sufficiente energia per attraversare la lamina d'argento e provocare le scintille urtando lo schermo! Per determinare la natura di questi corpuscoli il RUTHERFORD li esaminò in un campo magnetico; questo, come abbiamo già avuto occasione di far notare, ha la proprietà di deviare i corpuscoli carichi di elettricità, tanto più quanto più essi sono leggeri; un corpuscolo carico positivamente viene deviato in un senso, mentre uno carico di elettricità negativa viene deviato in senso opposto. Facendo quindi passare i corpuscoli generati nell'azoto attraverso ad un campo magnetico, il fisico inglese potè stabilire che essi sono p r o t o n i, cioè nuclei di idrogeno.

Si potè in questo modo per la prima volta affermare che l'uomo era finalmente riuscito a creare un elemento, l'idrogeno, da un altro, l'azoto; e poichè verosimilmente ogni nucleo di azoto aveva emesso un solo protone, era logico pensare che quel che restava del nucleo di azoto costituisse il nucleo di un altro elemento. L'esperienza di Lord RUTHERFORD non poteva dare

indicazioni su questo nucleo, perchè non suggeriva se la particella urtante era stata assorbita dal nucleo urtato o no, ma in seguito si potè determinare anche che cosa avviene della particella *alfa*, ripetendo l'esperienza in una camera di Wilson. Blackett e Harkins fecero a questo riguardo delle brillanti esperienze. Siccome la disintegrazione di un nucleo è un fenomeno molto raro (per ogni milione di particelle si liberano una ventina di protoni) essi provvidero la camera di Wilson di un dispositivo automatico col quale potevano fare una fotografia ogni 10 secondi; e presero così su un film cinematografico le fotografie di più di 400.000 tracce di particelle *alfa*.

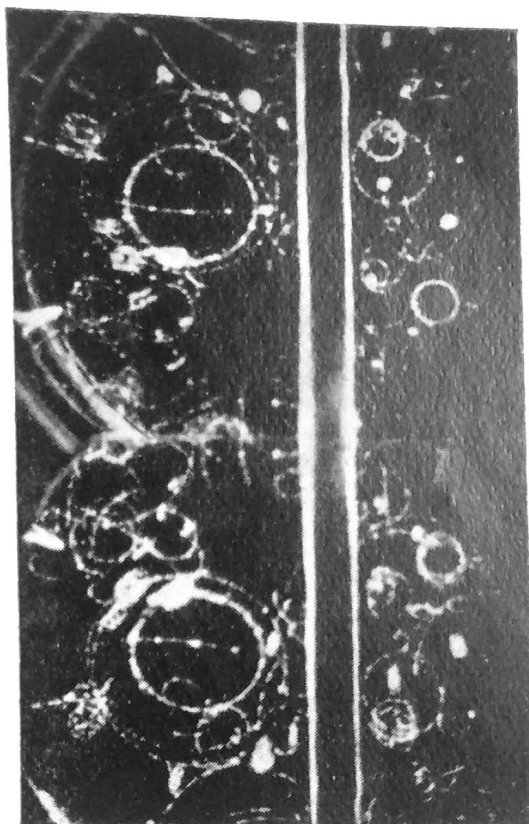
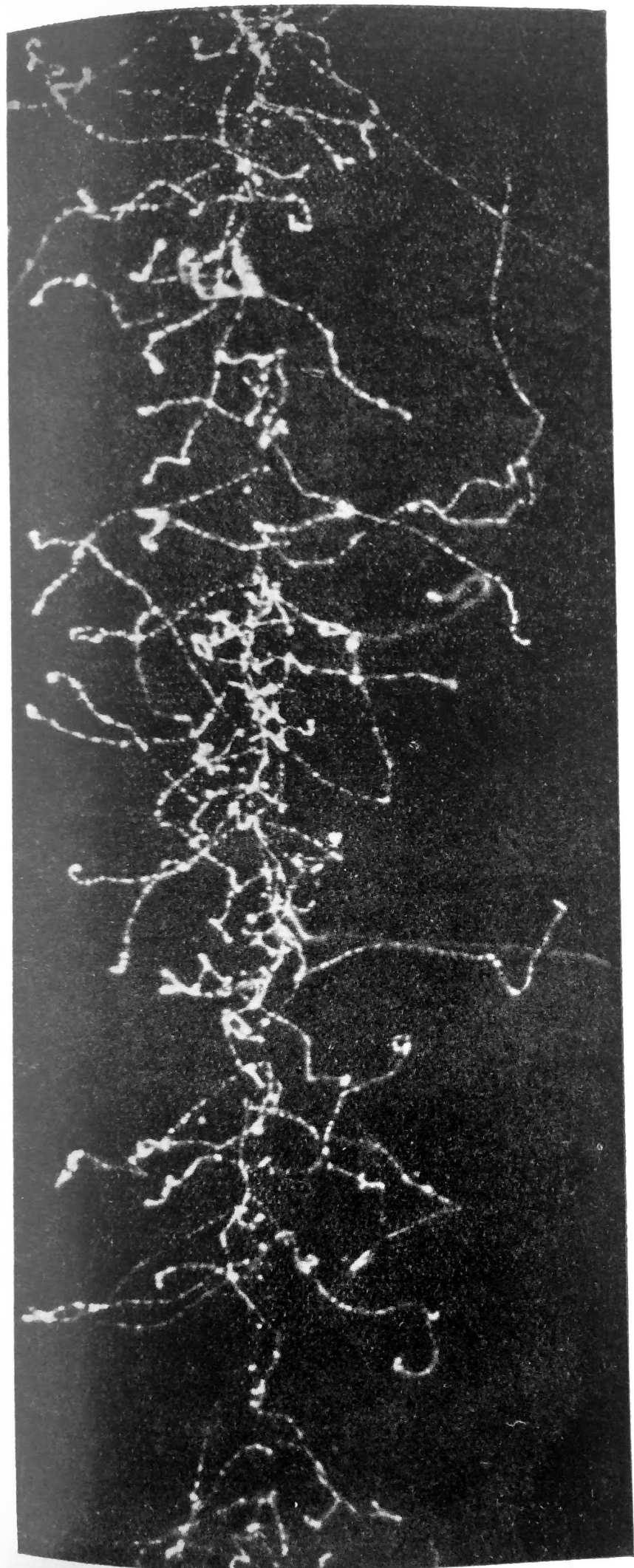
Si immagina facilmente che l'esame delle fotografie di queste 400.000 tracce non dovette certamente potersi fare in pochi minuti! Ma se la pazienza degli sperimentatori fu messa a dura prova, essi furono però ricompensati dal risultato: alcune tracce di particelle *alfa* portavano una biforcazione molto diversa da quella che si riscontra quando una particella *alfa* urta contro un nucleo senza spezzarlo (tav. XVII, *b*). Infatti uno dei due rami, molto sottile, era certo dovuto al protone emesso dal nucleo di azoto; il secondo ramo della biforcazione era più grosso di una traccia di particella *alfa*, e doveva quindi segnare il percorso di ciò che resta del nucleo di azoto dopo espulso il protone. Non si vede nella fotografia un terzo ramo, il quale corrisponda al percorso della

particella *alfa* dopo l'urto con l'azoto: si deve quindi ammettere che la particella *alfa* venga assorbita dal nucleo di azoto il quale emette poi un protone. L'intervallo di tempo che passa tra l'assorbimento della particella da parte del nucleo di azoto e l'emissione del protone, è così breve che i due fenomeni sono praticamente contemporanei; infatti nelle fotografie fatte con la camera di WILSON si vede che la traccia del protone comincia nello stesso punto in cui termina quella della particella *alfa*: come l'urto di un percussore fa scoppiare istantaneamente una cartuccia, così l'urto di un proiettile *alfa* fa scoppiare un nucleo di azoto, il quale dopo aver assorbito il proiettile, perde una delle sue particelle costitutive, un protone, trasformandosi in un nuovo nucleo.

Come si vede dalla tabella di MENDELEJEW, l'azoto ha numero atomico 7 e peso atomico 14; assorbendo una particella *alfa* (di numero atomico 2 e di peso atomico 4) ed emettendo un protone (di numero atomico 1 e peso atomico 1) diviene un elemento di numero atomico 8 $(= 7 + 2 - 1)$ e peso 17 $(= 14 + 4 - 1)$, esso cioè si è trasformato in un isotopo dell'ossigeno, di peso 17. Questo isotopo esiste in natura.

Le reazioni che avvengono fra i nuclei (in questo caso nuclei di elio e nuclei di azoto) si possono rappresentare come una reazione chimica qualsiasi; così si useranno per i nuclei gli stessi sim-

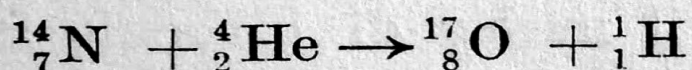
b)

a)

FOTOGRAFIE
IN CAMERA DI WILSON

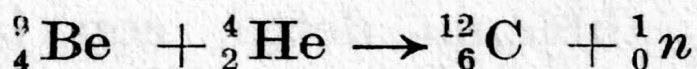
a) Tracce di elettroni secondari strappati dai raggi X alle molecole dell'aria, per effetto fotoelettrico;
b) Tracce di elettroni fortemente incurvati dall'azione di un campo elettrico.

boli che si usano per indicare gli atomi: nel nostro caso useremo i simboli dell'azoto, dell'elio, dell'ossigeno e dell'idrogeno, i quali sono rispettivamente N, He, O e H. Accanto a ogni simbolo porremo due numeri, uno più in alto e uno più in basso, che ci indichino rispettivamente il peso atomico e la carica nucleare dell'elemento; così il simbolo $^{14}_{7}N$ ci indica il nucleo di azoto di peso atomico 14 e di numero atomico 7. Come il numero degli atomi deve essere eguale nei due membri dell'equazione che ci rappresenta una reazione chimica, così nei due membri di un'equazione nucleare debbono restar costanti il numero complessivo delle particelle costituenti i nuclei, e cioè dei protoni e dei neutroni. Poichè il numero dei protoni ci indica la somma delle cariche nucleari e il numero totale di neutroni e protoni ci indica la somma dei pesi atomici, possiamo anche dire che in una reazione nucleare debbono restar costanti la somma dei pesi atomici e la somma delle cariche nucleari.

Il fenomeno che avviene quando si bombarda con particelle *alfa* dell'azoto, può indicarsi, dopo quanto abbiamo detto, con la seguente reazione nucleare:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

Oggi si conoscono diversi elementi che si comportano analogamente all'azoto, elementi cioè che sottoposti al bombardamento con particelle *alfa*

si trasmutano in un altro elemento stabile, dando luogo ad emissione di protoni. Tutti gli elementi però che vengono disintegrati dalle particelle *alfa* hanno numero atomico inferiore a 29; tra essi quelli più frequentemente e più completamente studiati sono l'azoto, il boro e l'alluminio. Però non tutti gli elementi che si disintegrano sotto l'azione delle particelle *alfa* emettono protoni: in seguito a esperimenti fatti dai coniugi francesi CURIE-JOLIOT e dai fisici inglesi del *Cavendish Laboratory* di Cambridge (CHADWICK e collaboratori) si potè stabilire che alcuni elementi bombardati con particelle *alfa* si trasmutano, come i precedenti, in altri elementi stabili; essi però invece di emettere dei protoni, dànno luogo ad emissione di neutroni. Tra questi elementi ricordiamo il litio ed il berillio; quest'ultimo, per esempio, assorbendo la particella *alfa* si trasforma in carbonio ed emette un neutrone. Se indichiamo con ${}^{1}_{0}n$ il neutrone emesso dal nucleo di berillio (${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$) in seguito al bombardamento di una particella *alfa* (${}^{4}_{2}\mathrm{He}$), la reazione nucleare sarà:

$${}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n$$

dove ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ è il nucleo di carbonio formatosi, di numero atomico 6 e di peso atomico 12.

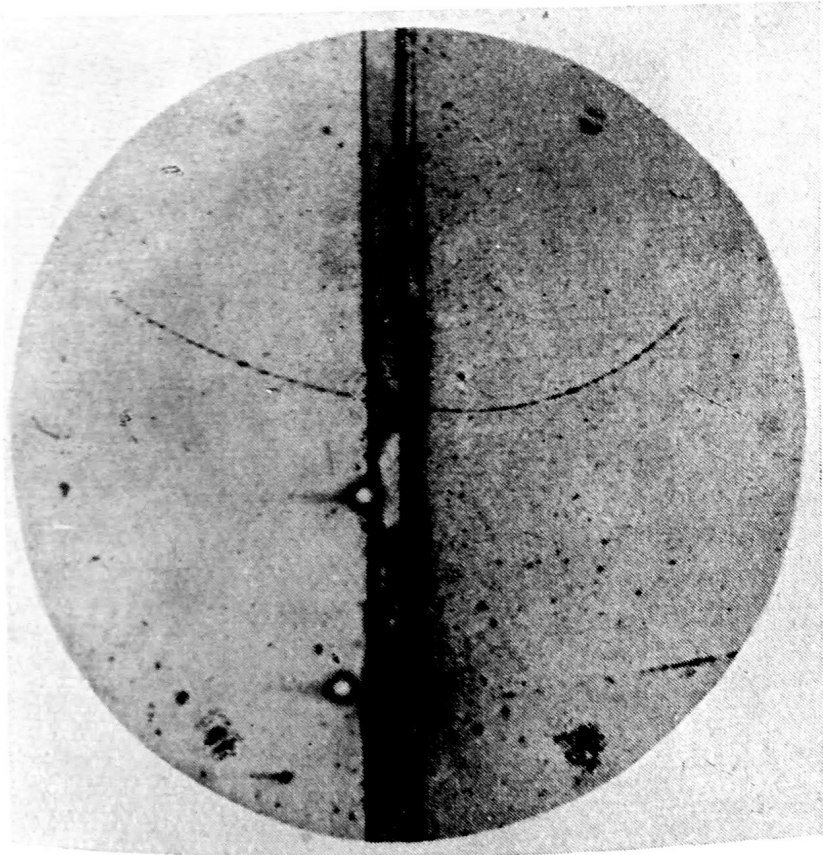
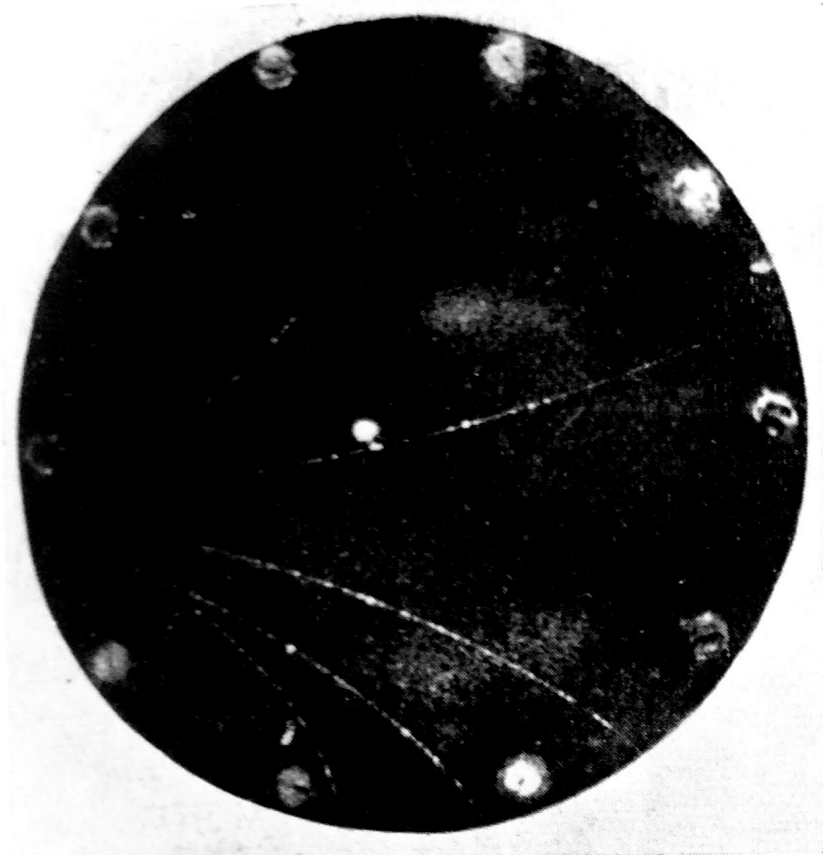
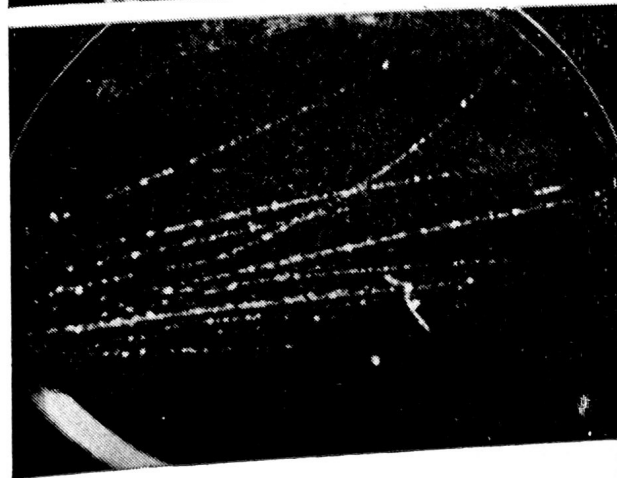
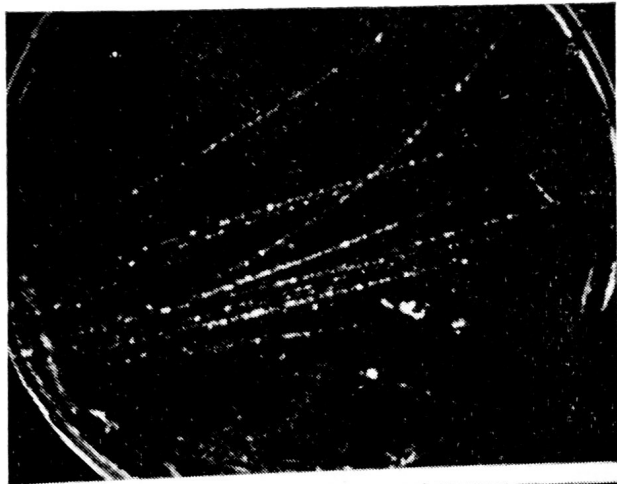
Le esperienze sul berillio furono fatte quando ancora non si conosceva l'esistenza del neutrone, e anzi sono state appunto queste esperienze che

ne hanno provocata la scoperta. Questo fatto apre la via a considerazioni filosofiche sui risultati dei lavori scientifici: si è partiti in questo caso da ricerche sulla possibilità di spezzare un nucleo; il successo nell'esperimento sull'azoto ha indotto i fisici a studiare se si potevano disintegrare con lo stesso metodo anche altri elementi. Le esperienze sulla disintegrazione artificiale hanno portato alla conclusione che alcuni nuclei emettono delle particelle di nuovo tipo, i neutroni; ma se i neutroni possono uscire dal nucleo, sia pure in circostanze eccezionali, è molto giustificato il supporre che essi facciano parte dell'edificio nucleare e ne siano uno dei costituenti. Ed ecco allora che i fisici teorici approfittano della scoperta dei colleghi sperimentali, per vedere se l'ammettere l'esistenza nel nucleo di questa nuova particella possa servire a spiegare la costituzione nucleare. Si riconosce così nel neutrone uno degli ingranaggi che mancavano alla teoria nucleare: le precedenti ipotesi sulla costituzione del nucleo potevano spiegare alcune questioni, ma zoppicavano quando si cercava di risolvere con esse altri problemi; proprio come una macchina che funzionerebbe irregolarmente, se un ingranaggio fosse stato sostituito con un altro non suo.

La scoperta del neutrone è stata dunque un fatto di grande importanza per i successivi sviluppi della fisica nucleare, certamente più importante che non l'aver accertato che il nucleo del

berillio può disintegrarsi, dopo che già molte esperienze del genere erano state fatte su altri elementi. Lo scienziato parte dunque da un punto e non sa dove arriva: vuole determinare un fatto e si trova davanti a fatti nuovi, molto più interessanti e fecondi di risultati. Ciò deve spronare i lavoratori a non fermarsi quando sembra loro che manchi un interesse diretto alle loro ricerche e deve insegnare al pubblico a non essere troppo scettico sulle possibilità presenti e future del lavoro scientifico.

Dalle esperienze che abbiamo fin qui riportate e da altre che per brevità omettiamo, risultò che solo alcuni degli atomi più leggeri sono sensibili al bombardamento con particelle *alfa* e nessun elemento più pesante del rame, che nel sistema di Mendelejew occupa il posto 29, si potè disintegrare con questo metodo; in tutti i casi solo una piccolissima parte del gran numero di proiettili usati produceva l'effetto desiderato. Le ragioni di un risultato così scarso sono di doppia natura: il proiettile *alfa*, muovendosi nella materia, ha poca probabilità di incontrare un nucleo, a causa della piccolezza di entrambi; quando poi questo incontro avviene, sorge un secondo ostacolo, che si oppone ad un urto violento ed efficace: sia il proiettile *alfa* che il nucleo bombar-

I

a)

b)

c)

a) Prima fotografia di una traccia dovuta indubbiamente a un elettrone positivo. (da *Anderson*)

b) Corpuscoli cosmici deviati da un campo magnetico (a sinistra, tre elettroni negativi; a destra due positivi). (da *Anderson*)

c) *Showers* di elettroni positivi e negativi. (da *Blackett e Occhialini*)

dato sono carichi di elettricità positiva e quindi si respingono con una forza che diventa grandissima quando la distanza tra i due corpuscoli diventa piccolissima; e la forza con cui un atomo bombardato respinge un proiettile *alfa* è tanto maggiore quanto maggiore è la sua carica elettrica, e quindi il suo numero atomico.

I proiettili usati dal RUTHERFORD hanno dunque una piccola probabilità di raggiungere i nuclei leggeri e non possono produrre alcun effetto su quelli pesanti: sembrerebbe dunque di dover concludere: se le particelle *alfa* non raggiungono tutti i nuclei, e sono poco efficaci anche sui nuclei che arrivano a urtare, prendiamo dei proiettili che abbiano i requisiti desiderati. Quando si voglia cambiare un determinato tipo di merce con un altro bisogna sempre scegliere fra i tipi che offre il mercato; ora il mercato di proiettili atomici è assai ristretto e non offre molte possibilità: le particelle che hanno un ordine di grandezza confrontabile col nucleo e che quindi possono essere efficaci a disintegrarlo per urto, sono:

le particelle *alfa*,
i protoni,
i deutoni,
i neutroni.

Un esame di queste particelle mostra che esse hanno tutte dei vantaggi e dei difetti; se quindi esistesse una bilancia capace di pesare i vantaggi e gli svantaggi presentati dai singoli corpuscoli,

si sarebbe senz'altro potuto misurare quale proiettile presenta i maggiori vantaggi; non esistendo questa bilancia non resta che giudicare secondo il criterio personale. Vedremo così in seguito come alcuni sperimentatori abbiano preferito usare un proiettile piuttosto che un altro; intanto però vogliamo dare al lettore un'idea delle proprietà dei vari corpuscoli nei riguardi della disintegrazione dei nuclei.

Abbiamo già commentato il difetto delle particelle *alfa* come proiettili: esse sono cariche positivamente e vengono quindi respinte dal nucleo bombardato. Poichè nella lista dei proiettili a disposizione dei fisici ne troviamo uno neutro, che cioè non ha nessuna carica, vien fatto di domandarsi come mai i neutroni non siano stati usati fin da principio per produrre le disintegrazioni nucleari. Queste particelle infatti non subiscono alcuna azione nè da parte degli elettroni, nè da parte dei nuclei; esse quindi debbono poter raggiungere questi ultimi assai più facilmente che non le particelle *alfa*. Il proiettile neutrone però, oltre ad alcuni svantaggi di cui parleremo più avanti presenta, o meglio presentava, una difficoltà essenziale: la sua esistenza non era conosciuta. Fin dopo il 1932 la scelta dei proiettili era limitata dunque alle particelle *alfa*, ed ai protoni e ai deutoni, poichè anche i deutoni furono scoperti in quell'epoca.

Gli ultimi due tipi di corpuscoli presentano

un vantaggio sulle particelle *alfa*: mentre queste hanno carica 2, protoni e deutoni hanno entrambi carica elettrica 1; quando la carica del proiettile viene ridotta a metà si riduce a metà anche la forza di repulsione su di esso esercitata dal nucleo. È quindi probabile che coi deutoni e protoni si possa produrre un urto più intimo coi nuclei degli elementi leggeri e che si possano raggiungere anche i nuclei di alcuni elementi più pesanti del rame.

Mentre però i proiettili *alfa* di grande energia vengono sparati spontaneamente dalle sostanze radioattive, senza alcun bisogno del nostro intervento, non esistono in natura dei deutoni e dei protoni veloci. Bisogna dunque prima di tutto, partendo dall'idrogeno e dal deuterio (=idrogeno pesante), procurarci i protoni e i deutoni, che non essendo animati di per sè da forti velocità, sono inefficaci come proiettili; si deve allora imprimere loro la maggior velocità possibile accelerandoli per mezzo di campi elettrici di grandissima intensità. Occorrono a questo scopo potenti impianti di alta tensione, che alcuni pochi laboratori possiedono effettivamente; dove però questi non esistono, sarebbe lungo e dispendioso il volerli costruire *ex novo*. Si comprende quindi come il bombardamento con protoni e deutoni non sia stato usato su vasta scala, ma solo lo abbiano applicato quei fisici che avevano a portata di mano delle alte tensioni.

Per procurarsi i protoni si parte direttamente dall'idrogeno che si può avere in grandi quantità; per ottenere invece i deutoni bisogna partire dall'idrogeno pesante che in piccolissima percentuale è mescolato all'idrogeno comune e da questo si può separare mediante procedimenti non troppo semplici.

Dobbiamo finalmente parlare dei difetti del neutrone, l'ultima particella che abbiamo a disposizione come proiettile. I neutroni non vengono emessi spontaneamente da nessun nucleo ma si liberano nella disintegrazione artificiale di alcuni elementi, fra i quali particolarmente usato è il berillio. Per disintegrare il berillio bisogna però usare dei proiettili, siano essi particelle *alfa* o deutoni veloci; e in media solo 1 proiettile su 100.000 arriva a colpire un nucleo di berillio, dando luogo all'emissione di un neutrone, mentre gli altri 99.999 proiettili vanno perduti. Lo svantaggio dell'usare neutroni invece che particelle *alfa* o deutoni è appunto questo: 100.000 particelle *alfa* ci rappresenterebbero un rifornimento di 100.000 proiettili per bombardare direttamente con esse i nuclei in esame; viceversa se si vogliono usare a questo scopo i neutroni, 100.000 particelle *alfa* ci forniscono 1 solo proiettile.

Può però essere talvolta più utile l'usare pochi proiettili di qualità superiore piuttosto che moltissimi di qualità scadente e i neutroni, come abbiamo già accennato, hanno delle ottime qualità:

poichè non vengono frenati nè dagli elettroni nè dai nuclei, nemmeno se passano vicino a questi, i neutroni non perdono energia per la strada e la possiedono ancora tutta quando arrivano a sbatacchiare contro un nucleo; l'urto sarà dunque in media assai più efficace di quello dovuto a una particella *alfa*. Di più il neutrone non sente alcuna differenza tra un nucleo pesante ed uno leggero, e quindi con lo stesso ardimento e la stessa probabilità di riuscita si slancia all'assalto di un nucleo di idrogeno o di un nucleo di uranio.

***

Premesse queste considerazioni aprioristiche, vediàmo quali furono i risultati ottenuti usando come proiettili i protoni, i deutoni e i neutroni. Abbiamo già detto che quando si vogliono usare i protoni come agenti di disintegrazioni nucleari, il problema che si impone è quello di ottenerli sufficientemente veloci. Questo problema è stato risolto in varie maniere, alle quali accenneremo molto sommariamente.

I fisici inglesi J. D. Cockcroft e E. T. S. Walton del *Cavendish Laboratory* di Cambridge nel 1932, dopo ben due anni di lavoro, riuscirono per primi a produrre dei protoni sufficientemente veloci per disintegrare dei nuclei: essi facevano passare i protoni, ottenuti ionizzando l'idrogeno con una scarica, in un tubo acceleratore, al quale

applicavano una differenza di potenziale di più di mezzo milione di volt, prodotta in un impianto di loro costruzione: un trasformatore di alta tensione forniva una differenza di potenziale alternata di circa 300 mila volt che, a mezzo di un geniale dispositivo di capacità e raddrizzatori, veniva resa continua e moltiplicata per un fattore 2 o 3.

Il fisico americano VAN DE GRAAFF ha ideato un altro metodo per produrre una elevatissima tensione, che anch'essa può venire applicata a un tubo acceleratore e servire così a imprimere forti velocità a particelle cariche. L'apparecchio di VAN DE GRAAFF (fig. 17) consiste in una macchina elettrostatica nella quale due strisce di seta, che scorrono ognuna su due perni, come un tappeto girevole, portano l'una delle cariche positive, l'altra delle cariche negative, rispettivamente in due grandissime sfere metalliche isolate. Se si fornisce continuamente elettricità alle due bande di seta, queste la portano in continuità alle due sfere; sembrerebbe così di poter caricare queste ultime all'infinito: vi è invece una limitazione alla carica, costituita dal fatto che un po' di elettricità si disperde dalle sfere nell'aria e quando la carica delle sfere raggiunge un valore molto elevato, la quantità di elettricità che vien persa per diffusione nell'aria, è eguale alla quantità di elettricità che vien portata dalle bande di seta. Con questa macchina si possono produrre delle differenze di potenziale di oltre 10 milioni di volt.

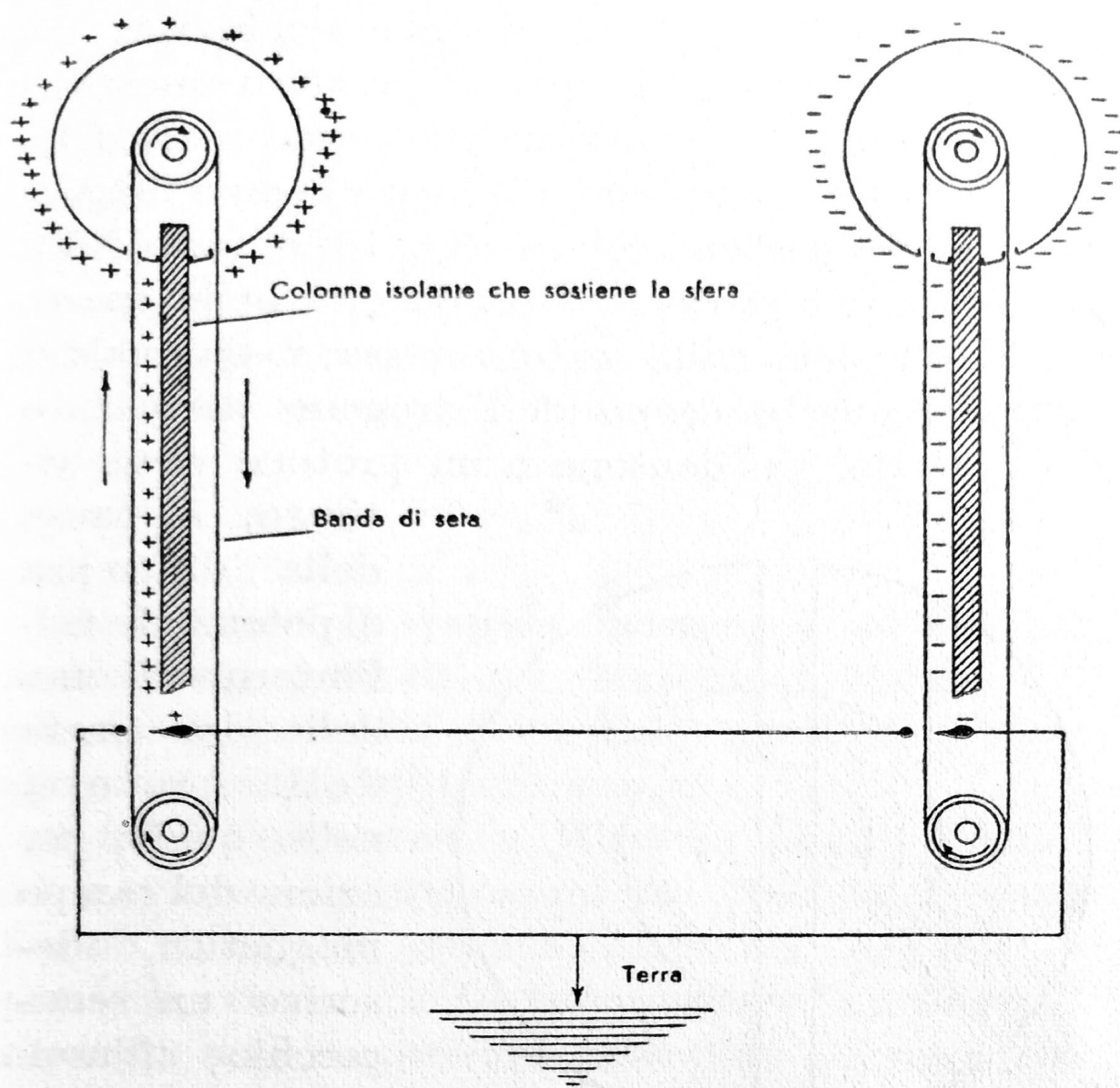



Fig. 17. — Schema della macchina elettrostatica di Van de Graaff, e del suo funzionamento.

Vi è finalmente un altro dispositivo per accelerare protoni e deutoni, che non consiste in un nuovo apparecchio per produrre alte tensioni, poichè è basato su un concetto diverso. Questo dispositivo, ideato dal fisico americano E. O. LAWRENCE, e da lui usato per la prima volta in esperienze eseguite coi deutoni, si chiama ciclatrone; esso con-

siste in una bassa scatola metallica cilindrica, divisa in due metà, alle quali è applicata una differenza di potenziale alternata: le due metà della scatola inoltre sono immerse in un campo magnetico ad essa perpendicolare (fig. 18 e tav. XV). I deutoni o i protoni si producono nello spazio tra le due metà della scatola stessa, nella quale si mette a questo scopo dell'idrogeno normale o del deuterio. Un deutone o un protone viene attirato, a causa della differenza di potenziale, nell'interno di una delle due metà della scatola, nella quale, per azione del campo magnetico, descrive un semicerchio; all'uscita, essendo il periodo della corrente alternata eguale al tempo che il corpuscolo ha impiegato a percorrere il semicerchio, la particella sarà attirata nell'altra metà della scatola, ove percorrerà un altro semicerchio, e così di seguito. La particella carica può percorrere in questo modo più di un centinaio di giri. Ogni volta che essa passa da una metà all'altra

Fig. 18. — Percorso dei protoni o dei deutoni nella macchina di Lawrence.

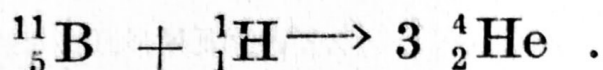
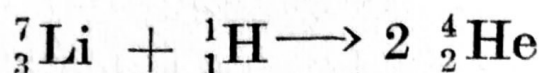
della scatola subisce l'azione del campo elettrico e quindi ogni volta la sua velocità aumenta.

L'apparecchio di LAWRENCE, per quanto sia concettualmente molto semplice è più costoso degli altri metodi per accelerare i protoni: esso consiste bensì in una scatola, ma questa ha dimensioni grandissime, tanto che il magnete che la circonda e che produce il campo pesa 60 tonnellate.

Passati così in rapida rassegna i metodi per accelerare i protoni e i deutoni, dobbiamo ora esaminare qualcuna delle disintegrazioni nucleari che si poterono ottenere con essi.

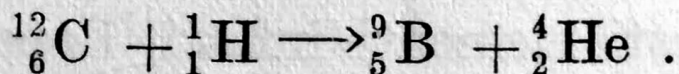
I fisici COCKCROFT e WALTON furono i primi ad eseguire disintegrazioni coi protoni, le quali furono in seguito studiate anche da altri fisici, e particolarmente da RUTHERFORD e OLIPHANT. I risultati delle esperienze fatte fino ad oggi portano alla conclusione che gli elementi bombardati con protoni, qualora si disintegrino, emettono tutti particelle *alfa*. È interessante esaminare un po' da vicino quello che avviene quando gli elementi bombardati sono il litio e il boro: i nuclei di questi elementi infatti, dopo assorbito il proiettile, esplodono e si rompono in frammenti eguali; il litio si spezza in due parti eguali che sono due particelle *alfa* e il boro si divide in tre particelle *alfa* secondo le reazioni:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow 2\ ^{4}_{2}\mathrm{He}$$

$$^{11}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow 3\ ^{4}_{2}\mathrm{He}\ .$$

La prova che le reazioni nucleari siano effettivamente queste si è avuta ripetendo l'esperienza nella camera di WILSON; si sono così ottenute delle fotografie della disintegrazione del litio, in cui si vedono le tracce di due particelle *alfa*, le quali partono dallo stesso punto e si dirigono in senso opposto. Così pure si sono ottenute delle fotografie della disintegrazione del boro, nelle quali si vedono molti gruppi di tre tracce di particelle *alfa* uscenti dallo stesso punto. Dalle direzioni delle particelle *alfa* che così si producono e dai loro percorsi, si può risalire alla loro energia e quindi alle energie contenute nei nuclei del litio e del boro.

Altri elementi furono bombardati con protoni, alcuni dei quali hanno dato risultati positivi, emettendo particelle *alfa*; fra questi i più noti sono il fluoro, il berillio e il carbonio. La reazione nucleare della disintegrazione di quest'ultimo è probabilmente:

$$^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{9}_{5}\mathrm{B} + ^{4}_{2}\mathrm{He}\ .$$

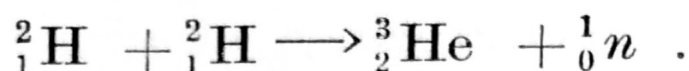
* * *

Le disintegrazioni nucleari prodotte per mezzo del bombardamento con deutoni sono state studiate soprattutto dal fisico americano LAWRENCE e dai suoi collaboratori. Non tutti gli atomi che si disintegrano sotto l'azione dei deutoni emettono le stesse particelle; infatti il litio, il berillio, l'azoto... emettono particelle *alfa*, mentre altri elementi emettono protoni o neutroni.

Vi è un caso in cui il bombardamento coi deutoni produce un altro effetto: nel 1934 OLIPHANT e HARTECK ebbero un'idea che può sembrare, diciamo così, poco cristiana, cioè quella di lanciare i fratelli contro i fratelli, i deutoni dotati di enormi velocità contro deutoni in quiete. Questa esperienza ha dato luogo a due risultati diversi: qualche volta il nucleo di idrogeno pesante bombardato, dopo avere assorbito il deutone proiettile, si è spezzato in un protone (cioè in un nucleo di idrogeno comune), ed in un nucleo di idrogeno ancora più pesante del deuterio, il quale prende il nome di idrogeno 3; la reazione nucleare in questo caso è:

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{1}_{1}H + ^{3}_{1}H$$

e i superstiti della lotta sono altri due membri della stessa famiglia. Altre volte invece il deutone

bombardato assorbe il deutone proiettile, ed esplode dando luogo ad un isotopo dell'elio e ad un neutrone:

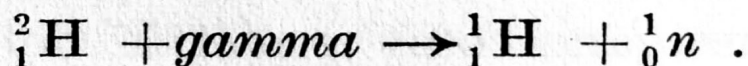
$$^2_1H + ^2_1H \longrightarrow ^3_2He + ^1_0n \ .$$

Recentissimamente il fisico DEE ha pubblicato di aver ripetuto questa esperienza nella camera di WILSON, e di aver ottenuto così alcune fotografie in cui si osserva una traccia diversa dalle altre, la quale ha le caratteristiche che si possono prevedere per una traccia di idrogeno 3.

Supponiamo ora di usare come proiettili per disintegrare i nuclei, i neutroni invece di particelle *alfa*, o di protoni, o di deutoni; di fare uso cioè di corpuscoli elettricamente neutri invece che di particelle cariche positivamente. In questo caso, quando un neutrone proiettile incontrerà un nucleo, si avrà sempre l'urto effettivo, poichè non esiste più la repulsione elettrica, la quale nei casi precedenti era dovuta al fatto che sia la particella proiettile che il nucleo bombardato erano carichi positivamente. Avremo quindi a parità di numero di proiettili, un maggior numero di trasmutazioni, cioè un maggior rendimento.

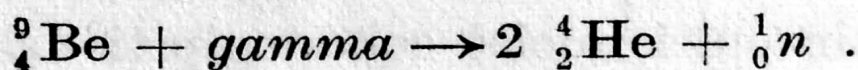
Trasmutazioni per mezzo di bombardamento con neutroni sono state studiate per la prima volta

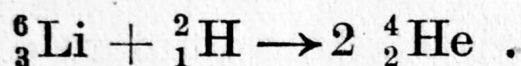
zione un po' azzardata. Però vi sono delle ragioni che in un certo senso giustificano il nostro modo di esprimerci: sappiamo infatti che nella meccanica quantistica una radiazione elettromagnetica si interpreta come l'insieme di un grandissimo numero di piccoli pezzetti di energia, i quanti o granuli di energia, emessi ognuno in un singolo processo e analoghi quindi ai corpuscoli. In questo senso dunque, possiamo considerare i quanti come proiettili, e quindi parlare di bombardamento coi raggi *gamma*.

I nuclei sottoposti a bombardamento con questi raggi sono stati i deutoni: questi, dopo essere stati colpiti dai raggi *gamma* sono esplosi dando luogo a protoni e neutroni, secondo la reazione nucleare:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + gamma \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}n \ . $$

Poco dopo l'ungherese SZILARD e l'inglese CHALMERS sottoposero a bombardamento *gamma* nuclei di berillio; uno dei prodotti della trasformazione è certamente un neutrone, ma non è stato possibile riconoscere con certezza la natura delle altre particelle che si liberano nell'esplosione del nucleo di berillio; pare tuttavia che si tratti di due particelle *alfa*, nel qual caso la reazione nucleare sarebbe:

$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + gamma \longrightarrow 2\ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n \ . $$

***

Le particelle che si liberano in una trasmutazione di un elemento in un altro, vengono espulse dal nucleo con grandissima velocità, e sono quindi dotate di grande energia. Fermiamo per un momento la nostra attenzione sulla trasformazione del litio in elio per bombardamento di deutoni; la trasformazione nucleare è la seguente:

$$ {}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\ {}^{4}_{2}\mathrm{He}\ . $$

Ognuna delle due particelle *alfa* possiede, dopo l'esplosione del nucleo, una energia di 8 milioni di volt-elettrone.

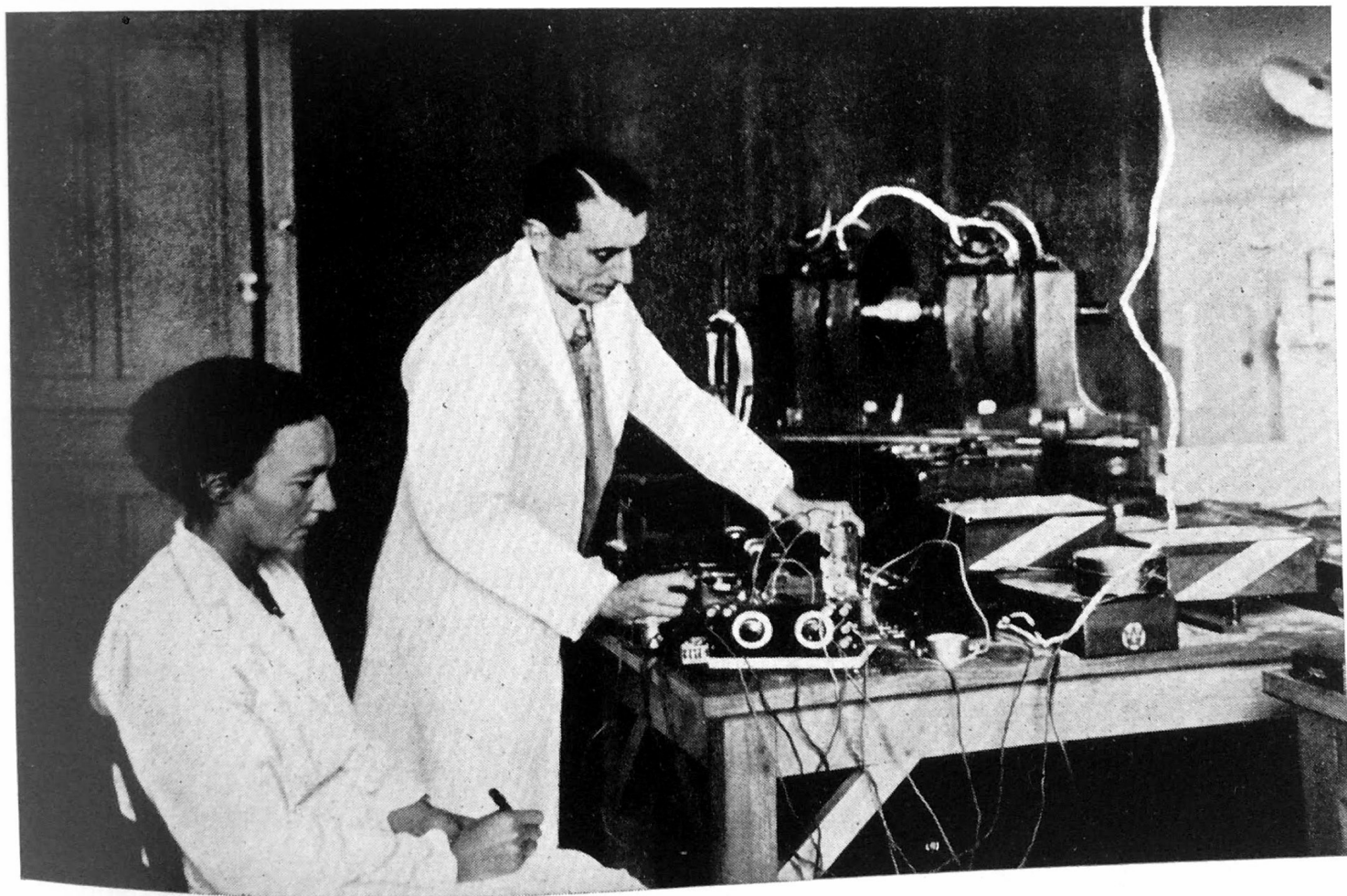
Il « volt-elettrone » è una unità che è stata introdotta dai fisici nell'uso comune; ed è precisamente l'energia di un elettrone che sia accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt. Perciò si dice per esempio che una particella ha una energia di un milione di volt-elettrone, quando essa è dotata della stessa energia che avrebbe un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di un milione di volt.

Nell'esempio del litio precedentemente considerato l'energia che si libera per la trasmutazione del nucleo di litio in elio, è data dalla somma delle energie delle due particelle, e sarà quindi 16 milioni di volt, che equivale a $5 . 10^{-13}$ calorie. Per

renderci conto della grandezza di questa energia, basta pensare che nella combustione di una molecola di uno degli idrocarburi costituenti la benzina, si libera una energia di 10^{-18} calorie, quindi una energia 500.000 volte minore. Nella combustione della benzina però si riesce ad ottenere una grandissima quantità di energia perchè si conosce il metodo per far bruciare miliardi e miliardi di molecole. Nel caso della disintegrazione nucleare invece non si conosce un metodo analogo; fino ad oggi almeno non si sa provocare la disintegrazione di un grandissimo numero di nuclei; infatti, come abbiamo visto, quando si bombarda un elemento con particelle, soltanto qualche proiettile su un milione raggiunge un nucleo e ne provoca l'esplosione. Se si riuscirà un giorno a provocare la disintegrazione di tutti i nuclei contenuti in un grammo di litio, si realizzerà un'energia di 50.000 milioni di calorie, sufficienti a far bollire una massa di acqua di un milione di litri.

Tale energia naturalmente non si crea all'atto della disintegrazione, ma è immagazzinata nel nucleo di ogni atomo e viene liberata soltanto nella sua violenta esplosione.

Dirac

Niels Bohr

Irène Curie e F. Joliot

Capitolo IX

LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE

Nel dicembre del 1933 una nuova scoperta dei coniugi Joliot destava ammirazione e entusiasmo fra i fisici, vivo interesse fra i profani; questi già illustri fisici francesi pubblicavano infatti che alcuni nuclei bombardati con particelle *alfa* possono diventare radioattivi; e al nuovo fenomeno davano il nome di radioattività artificiale.

Nelle trasmutazioni artificiali provocate fino agli ultimi mesi del 1933, si era sempre osservato che un nucleo, urtato da un proiettile, si modificava istantaneamente, spezzandosi e assorbendo il proiettile, per dare luogo ad un altro nucleo stabile; la trasformazione è dunque caratterizzata dal fatto che il suo prodotto finale è stabile. Quando per esempio un nucleo di alluminio veniva urtato da una particella *alfa*, esso assorbiva la particella e immediatamente emetteva un protone, trasformandosi in un nucleo stabile di silicio.

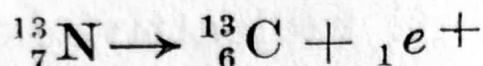
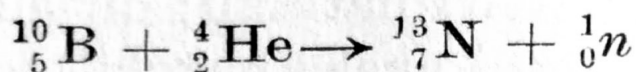
Verso la fine del 1933 i Joliot studiavano appunto in una camera di Wilson la trasformazione

dei nuclei radioattivi naturali; di più le leggi con cui si disintegrano i nuclei instabili sono le stesse, sia per gli elementi radioattivi naturali che per quelli artificiali.

Un'altra caratteristica della radioattività artificiale, che apparve evidente già nei primi lavori, è che le trasformazioni nucleari avvengono in due tempi ben distinti: da prima un proiettile urta il nucleo e ne provoca subito la trasformazione in un altro nucleo instabile radioattivo; in un secondo tempo quest'ultimo emette spontaneamente una particella per dare origine ad un nucleo stabile.

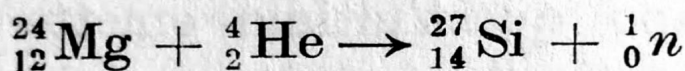
Le esperienze dei coniugi JOLIOT non si sono naturalmente limitate all'alluminio: essi si sono dati ad uno studio accurato, sottoponendo ad un intenso bombardamento di particelle *alfa* alcuni altri elementi leggeri, come il boro e il magnesio; ed hanno osservato che anche questi, come l'alluminio, diventano radioattivi, ed emettono elettroni positivi. Il meccanismo più probabile secondo il quale avviene la trasformazione nel caso del boro è la seguente: il boro in un primo tempo cattura la particella bombardante ed emette un neutrone, originando così un nucleo instabile che ha la stessa carica dei nuclei normali di azoto, di cui è un isotopo. In un secondo tempo il nucleo di azoto radioattivo emette un positrone e si trasforma in carbonio stabile. Le due reazioni nucleari successive sono dunque probabilmente:

$$^{10}_{5}B + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$$

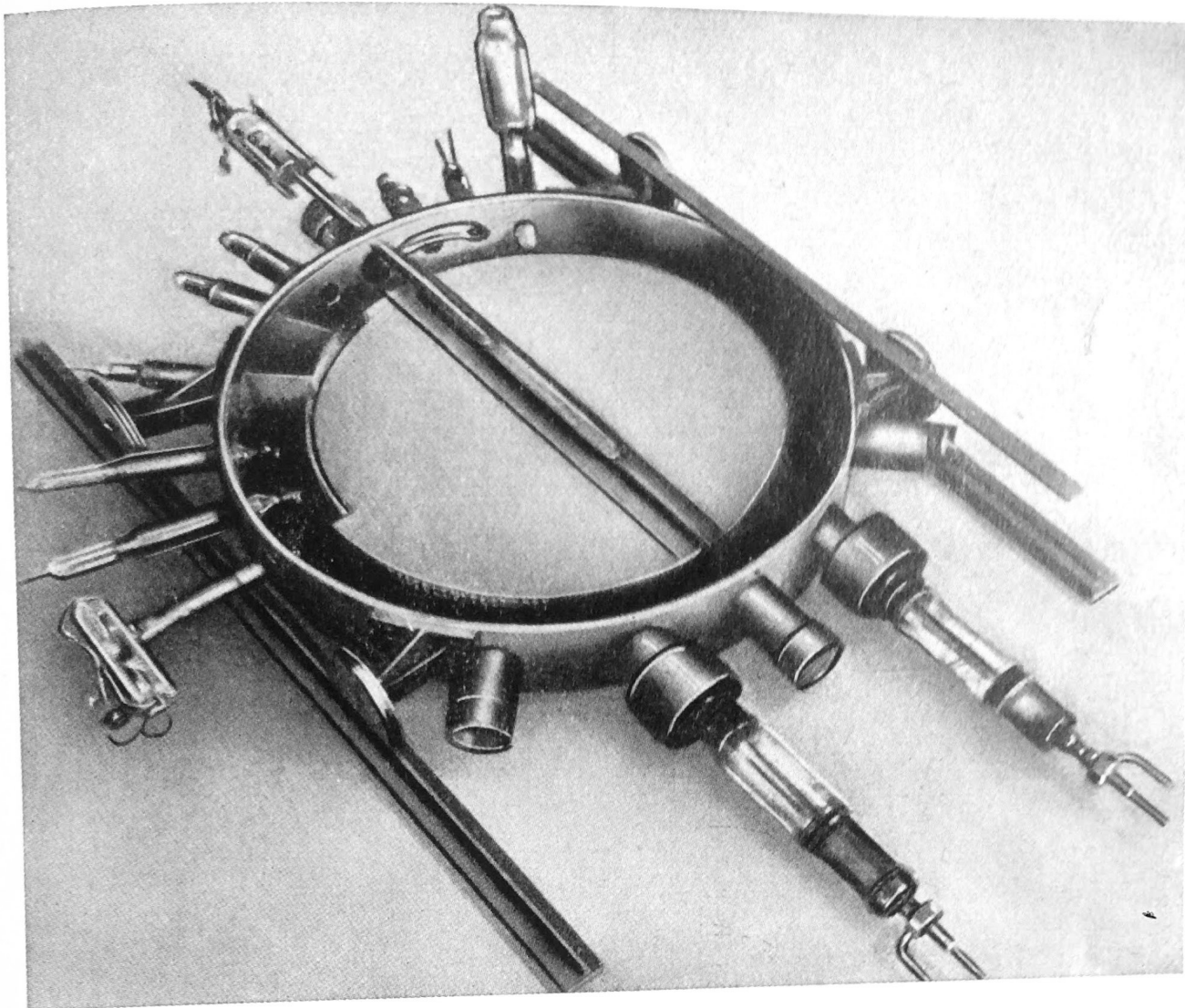
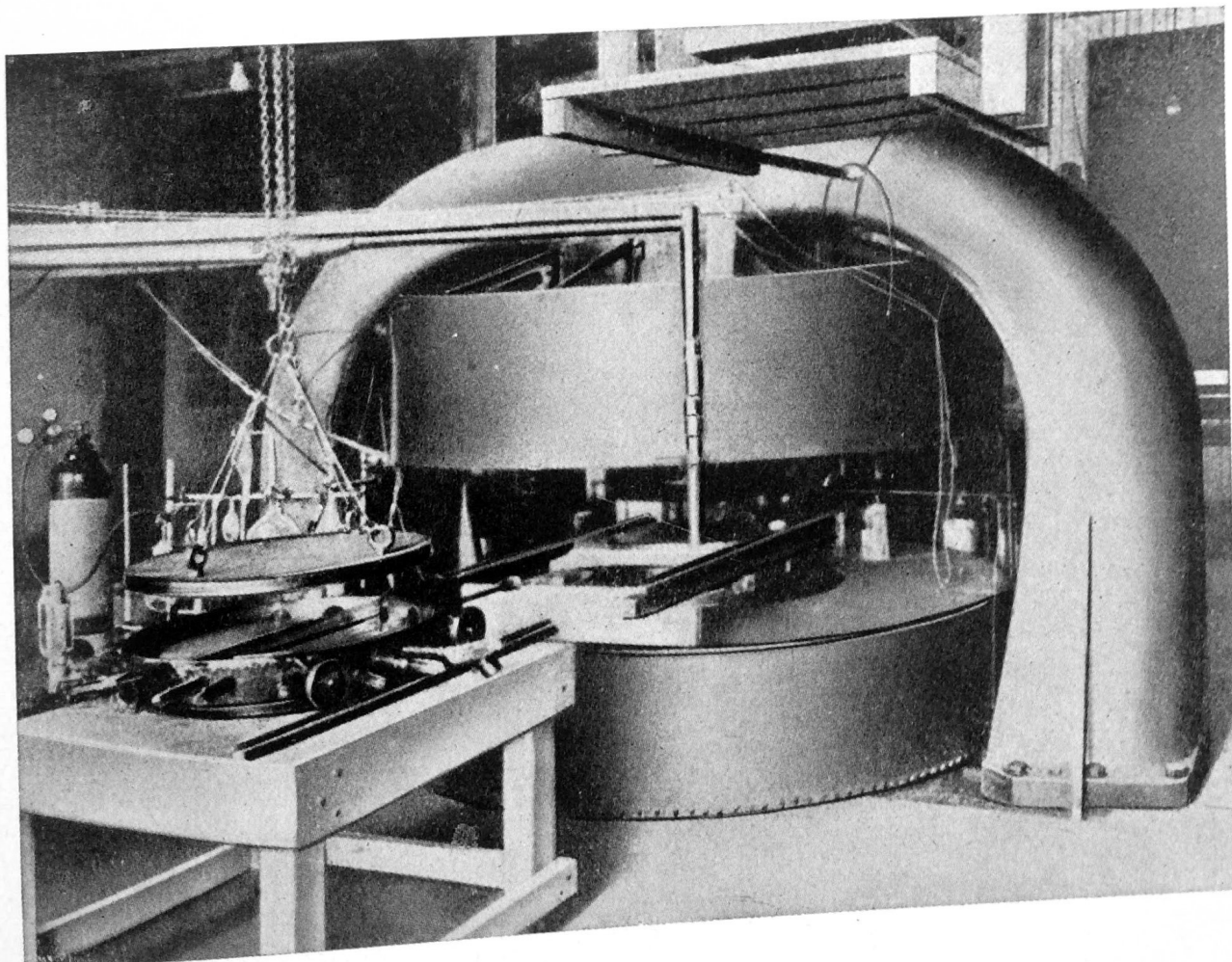
$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + {}_{1}e^{+}$$

in cui con ${}_{1}e$ si è indicato un elettrone positivo.

Il magnesio probabilmente assorbe anche esso il nucleo di elio urtante e si trasforma in un isotopo instabile del silicio, il quale si disintegra dando luogo ad alluminio stabile, secondo le reazioni:

$$^{24}_{12}Mg + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{27}_{14}Si + ^{1}_{0}n$$

$$^{27}_{14}Si \rightarrow ^{27}_{13}Al + {}_{1}e^{+} \quad .$$

Nonostante il numero esiguo di atomi che si formano in queste trasformazioni, è stato possibile verificare per mezzo dell'analisi chimica che i nuclei radioattivi formatisi dal boro e dal magnesio sono effettivamente nuclei di azoto e di silicio; illustreremo tra breve i metodi che si usano per eseguire in questi casi l'analisi, ma prima vogliamo dire due parole sul come si rivelano i positroni emessi dalle sostanze radioattive artificiali.

Per uno studio sistematico degli elementi radioattivi artificiali, la camera di WILSON si è mostrata poco adatta: in essa infatti le fotografie si fanno necessariamente ad una certa distanza di tempo l'una dall'altra, e perciò sfugge il passaggio di molti elettroni. Per esaminare invece se le varie

Tav. XV

Ciclatrone di Lawrence

Ciclatrone di Lawrence tra i poli della enorme calamita

sostanze sono diventate radioattive, dopo essere state irradiate con le particelle *alfa* o con altri proiettili nucleari, occorre un apparecchio molto sensibile, capace di mettere in evidenza ogni singola particella. Nelle esperienze di radioattività artificiale si è perciò scelto il contatore a filo come strumento tipo, salvo poi a ripetere qualche esperienza nella camera di WILSON.

Col contatore a filo non si individua dunque il nucleo stabile che è il prodotto finale delle trasformazioni nucleari, ma si mette invece in evidenza l'elemento intermedio che spara delle particelle. Nelle imboscate militari fatte di notte, non ci si accorge dei soldati che si avvicinano, ma soltanto si avvertono quando si decidono ad aprire il fuoco con i loro fucili: così portando una sostanza irradiata vicino ad un contatore, questo registra le fucilate sparate dai nuovi nuclei.

In questo modo i JOLIOT poterono verificare che l'attività dei nuclei radioattivi formatisi dal boro, dall'alluminio e dal magnesio decade col tempo, analogamente al caso degli elementi radioattivi naturali; trovarono poi che l'azoto radioattivo che si forma dal boro, ha un periodo di 14 minuti, cioè dopo 14 minuti la sua attività si è dimezzata; l'attività del silicio radioattivo, proveniente dal magnesio, si dimezza in due minuti e mezzo; e infine il periodo di riduzione a metà per i nuclei che si ottengono irradiando l'alluminio è di tre minuti.

Il tempo di riduzione a metà è una grandezza che ha una importanza più grande di quello che potrebbe sembrare a prima vista: poichè esso è sempre lo stesso per lo stesso elemento, costituisce una costante che serve ad individuare l'elemento. Di solito due elementi qualunque si distinguono a colpo per le loro proprietà esteriori: nessuno ricorre a speciali mezzi per riconoscere per esempio l'oro e lo zolfo. Bisogna invece ricordare che gli elementi radioattivi artificiali sono sempre in quantità piccolissime e nessun metodo permette di distinguerli direttamente: non potremo mai dire per esempio: dal boro si è formato un gas nel quale nulla brucia, incoloro, ecc.... quindi si è formato azoto. Ma poichè i radioelementi artificiali sparano delle particelle, e la loro caratteristica, rivelabile col contatore, è la durata della loro sparatoria, tutte le volte che incontreremo un elemento la cui attività si dimezza in 14 minuti, potremo dire: « questo è azoto ».

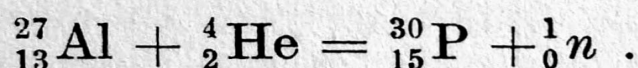
Il conoscere i vari tempi di riduzione a metà serve anche ad un altro scopo: una sostanza irradiata presenta la massima attività, quando è stata bombardata per un tempo dell'ordine di grandezza di quello con cui si riduce a metà l'elemento radioattivo da essa formatosi: così, perchè il boro raggiunga il valore massimo della attività, bisognerà sottoporlo all'azione delle particelle *alfa* per circa un quarto d'ora, poichè l'azoto che ha preso origine dal boro, ha un pe-

radioattive artificiali si formano in quantità talmente minima, che se anche si potesse prenderli uno ad uno con una microscopica pinzetta, e metterli tutti insieme, nessun reagente chimico potrebbe nemmeno lontanamente indicarci la loro presenza. L'artificio usato per separare i pochi atomi radioattivi dalla massa di sostanza inerte è basato su una proprietà degli atomi, che potrebbe chiamarsi *spirito di corpo*. Possiamo esser sicuri che se un soldato di fanteria vede vari gruppi di soldati appartenenti alle varie armi si avvicinerà, per spirito di corpo, al gruppo dei soldati di fanteria. Così se un atomo radioattivo, per esempio di azoto, si trova in una soluzione in cui sono presenti altri atomi di azoto stabile, si unisce a loro, e segue le loro sorti, qualunque esse siano.

Nella analisi chimica di una sostanza resa attiva dal bombardamento di proiettili, si tiene conto del fatto che l'elemento radioattivo formato deve avere numero atomico prossimo a quello dell'elemento di partenza; si procede allora al modo seguente: la sostanza irradiata si porta in soluzione, e a questa si aggiungono piccole quantità delle sostanze che nel sistema di MENDELEJEW si trovano vicino a quella in esame. Si potranno allora separare, con gli ordinari metodi chimici, i vari elementi che sono nella soluzione, e avvicinandoli successivamente ad un contatore, riconoscere quale elemento ha trascinato con sè

l'attività. Da quanto si è detto si può concludere che se un certo elemento ha trascinato con sè l'attività vuol dire che gli atomi radioattivi formati sono isotopi di questo elemento.

I coniugi JOLIOT, per esempio, vollero studiare più da vicino il comportamento dell'alluminio, e determinare quale radioelemento si forma quando lo si bombarda con particelle *alfa*. Essi allora portarono in soluzione di acido cloridrico l'alluminio irradiato, e poichè avevano delle ragioni per supporre che l'elemento radioattivo che si era originato fosse fosforo, aggiunsero alla soluzione del fosfato di sodio: separando poi il fosforo verificarono che esso trascina con sè l'attività. L'alluminio quindi deve assorbire i proiettili *alfa* e trasformarsi in un isotopo instabile del fosforo, secondo la reazione:

$$ {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n \; . $$

I nuclei di fosforo radioattivi emettono in seguito positroni e si riducono a nuclei stabili di silicio.

Questo metodo di analisi chimica è stato usato in tutte le esperienze di radioattività artificiale fatte in seguito a quelle dei JOLIOT; sono state così esaminate molte sostanze radioattive artificiali, tranne, naturalmente, quelle che si disintegrano troppo rapidamente per potere fare le operazioni necessarie alla loro separazione, nel

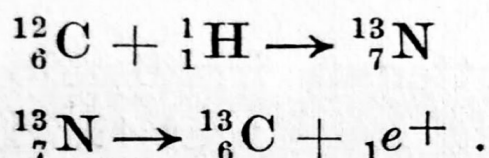
breve tempo durante il quale esse sono ancora in vita. La tecnica delle separazioni chimiche è stata molto perfezionata, cosicchè attualmente i fisici arrivano a compierle anche in soli due o tre minuti.

In seguito alle esperienze dei coniugi JOLIOT, altri fisici si sono dedicati allo studio dello stesso fenomeno e usando sempre come proiettili le particelle *alfa* hanno confermato i loro risultati. Inoltre hanno potuto provocare la formazione di altri elementi radioattivi artificiali: così LISE MEITNER ha constatato che anche il litio, il fluoro e lo zinco si possono attivare. FRISCH ha prodotto la radioattività artificiale nel sodio e nel fosforo e ha constatato che i loro periodi di riduzione a metà sono rispettivamente di 7 secondi e 40 minuti.

Immediatamente dopo la scoperta dei radioelementi artificiali, fatta da I. CURIE e F. JOLIOT, furono da vari fisici iniziate esperienze bombardando i nuclei dei vari elementi con proiettili diversi dalle particelle *alfa*. COCKCROFT, GILBERT e WALTON hanno bombardato nuclei di carbonio usando come proiettili dei protoni, ai quali era stata impressa una accelerazione per mezzo di una differenza di potenziale di 600 mila volt, mediante l'impianto che abbiamo descritto nel

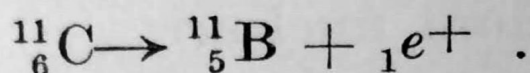
capitolo precedente. In questo caso il prodotto finale della trasmutazione è un isotopo stabile del carbonio; precisamente il nucleo di carbonio, bombardato, assorbendo un protone, si trasforma in un isotopo instabile dell'azoto; questo successivamente si disintegra emettendo un positrone e dando luogo ad un nucleo di carbonio stabile, isotopo di quello di partenza; e scrivendo le successive reazioni nucleari:

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N$$

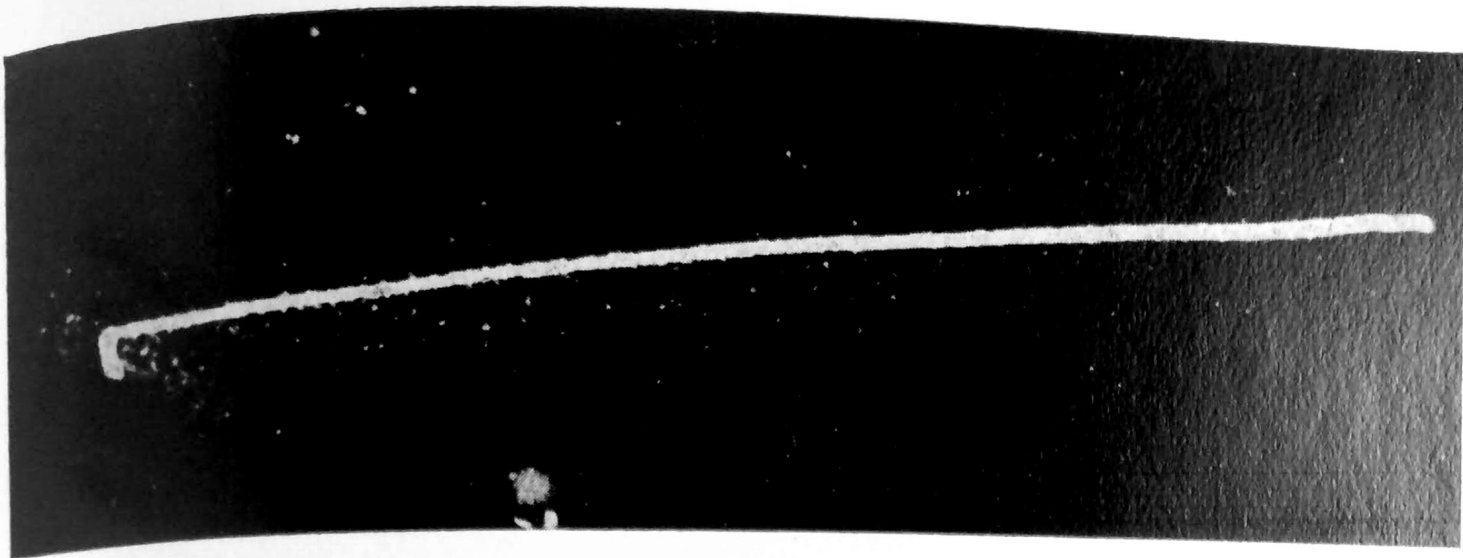
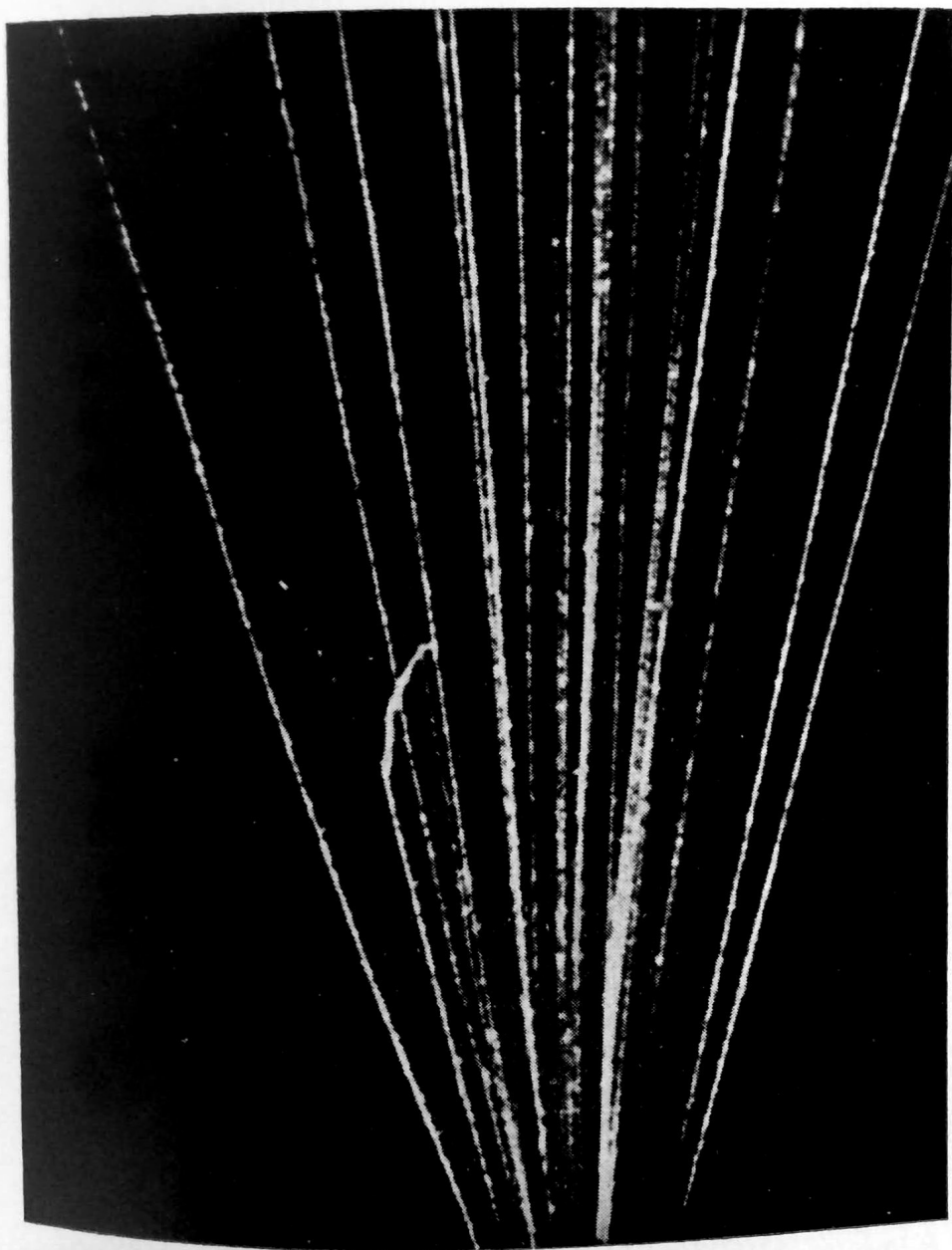
$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + {}_{1}e^{+} \; .$$

Naturalmente il bombardamento per mezzo di protoni non è stato tentato soltanto sul carbonio: HENDERSON, LIVINGSTON e LAWRENCE hanno bombardato per mezzo di protoni molti elementi che nella tabella di MENDELEJEW son compresi tra il litio e il cloro, cioè elementi di peso atomico compreso tra 7 e 35; queste esperienze però non hanno avuto alcun successo, tranne che nel caso del carbonio. Questi fisici allora sostituirono nel generatore di protoni l'idrogeno pesante all'idrogeno ordinario, in modo da ottenere come proiettili deutoni invece di protoni. Ebbene questi deutoni, successivamente accelerati, si sono mostrati assai efficaci: il bombardamento per mezzo di deutoni, accelerati con una differenza di potenziale di tre milioni di volt, ha provocato la formazione di radioelementi, i quali si disinte-

grano emettendo elettroni positivi e raggi *gamma*. Il boro per esempio, assorbe un deutone e si trasmuta, emettendo un neutrone, in un isotopo instabile del carbonio: questo successivamente si disintegra emettendo un positrone e trasformandosi in un isotopo stabile del boro stesso:

$$^{10}_{5}B + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{11}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

$$^{11}_{6}C \rightarrow ^{11}_{5}B + {}_{1}e^{+} \ .$$

I risultati ottenuti irradiando gli atomi con particelle cariche sono limitati ad alcuni elementi leggeri. Ciò è dovuto, come già si è visto nelle trasmutazioni artificiali, alla repulsione elettrostatica che agisce tra nuclei e proiettili, carichi entrambi positivamente. Tale repulsione, che è tanto maggiore quanto maggiore è la carica del nucleo, e quindi il peso atomico, impedisce già per elementi non molto pesanti, un urto intimo tra il nucleo e il proiettile.

Dopo avere esaminato gli effetti delle particelle *alfa*, dei protoni e dei deutoni, come agenti per produrre i nuovi nuclei radioattivi resta ancora da parlare della radioattività provocata da bombardamento di neutroni.

L'idea di tentare l'uso dei neutroni per questo tipo di esperienze è del fisico italiano ENRICO

a) Disintegrazione di un nucleo di azoto per bombardamento di neutroni; la traccia corta è dovuta ad un nucleo di boro, quella lunga a una particella alfa.

b) Disintegrazione dell'azoto mediante il bombardamento con particelle alfa. Una delle tracce di particelle alfa si biforca in due rami: quello più sottile è dovuto a un protone, quello più grosso a un nucleo di ossigeno.

FERMI; e diciamo tentare poichè non era affatto sicuro che il proiettile neutrone fosse particolarmente efficace: come abbiamo già notato altrove i neutroni hanno maggiore probabilità che non le particelle cariche di raggiungere i nuclei contro i quali vengono lanciati; peraltro essi non escono spontaneamente dai nuclei ma si possono ottenere bombardando con particelle *alfa* o con protoni veloci alcuni elementi, tra i quali è particolarmente adatto il berillio: in questo modo però si ottiene solo un neutrone per ogni 100 mila particelle *alfa*, e quindi i vantaggi presentati dai neutroni per il fatto di essere elettricamente neutri avrebbero anche potuto essere sopraffatti dal grosso inconveniente della perdita di un enorme numero di particelle *alfa*.

Malgrado l'incertezza dei risultati il FERMI ha ritenuto opportuno di tentare l'uso dei neutroni come proiettili, e ha organizzato le esperienze nell'Istituto Fisico di Roma; esse sono state eseguite da lui stesso e dai fisici FRANCO RASETTI, EMILIO SEGRÈ, EDOARDO AMALDI e BRUNO PONTECORVO e dal chimico OSCAR D'AGOSTINO. Il loro tentativo è stato fortunato: mentre nelle precedenti esperienze si era riusciti a provocare la radioattività artificiale solo in alcuni elementi leggeri, nelle esperienze coi neutroni è stato possibile produrre una cinquantina di elementi radioattivi, senza nessuna preferenza per quelli leggeri su quelli pesanti.

È importante notare fin da questo momento, per quanto vi torneremo in seguito, che gli elementi sottoposti all'azione dei neutroni danno origine a nuclei radioattivi i quali emettono tutti elettroni negativi per trasmutarsi in nuclei stabili; i radioelementi prodotti col bombardamento di particelle cariche emettono invece, come abbiamo visto, elettroni positivi.

Per le esperienze di Roma, occorreva dunque avere a disposizione una intensa sorgente di particelle *alfa*, per liberare i neutroni dal berillio.

Questa sorgente non deve disintegrarsi troppo lentamente, perchè in tal caso produrrebbe particelle poco fitte, e nemmeno deve avere vita media troppo breve, perchè non darebbe il tempo di fare le esperienze. È stata dunque scelta, come sorgente di particelle *alfa* l'emanazione di radio, la cui attività si dimezza in circa 4 giorni.

Una miscela di emanazione e di polvere di berillio, posta in un semplice tubetto di vetro lungo un centimetro e mezzo, costituisce la sorgente dei neutroni. Con essa sono state esaminate sistematicamente tutte le sostanze che i fisici di Roma hanno potuto procurarsi.

Le particelle *alfa* e *beta* emesse dall'emanazione restano assorbite dalle pareti di vetro del tubetto, ma i raggi *gamma* emessi contemporaneamente,

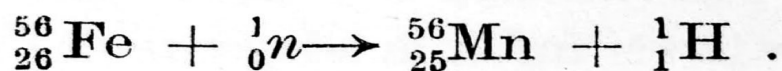
hanno potere penetrante assai più grande e potrebbero, dopo avere attraversato il tubetto di vetro, portare delle perturbazioni negli strumenti di misura; per evitare questo inconveniente, le misure col contatore si fanno in una stanza ben separata da quella in cui si irradia l'elemento in esame con la sorgente dei neutroni.

Possiamo ora esaminare come si procede quando si voglia studiare il comportamento per esempio del ferro sotto l'azione dei neutroni. Perchè il massimo numero delle particelle eventualmente emesse dal ferro dopo l'irradiamento possano entrare nel contatore, si dà generalmente al ferro la forma di un cilindretto cavo lungo circa 5 cm., nel quale può entrare il contatore. Dentro a questo cilindretto si infila la sorgente dei neutroni, che viene tolta dopo due o tre ore: si porta allora il cilindretto sul contatore, e ci si può così accorgere che il ferro è diventato radioattivo e spara elettroni: la sua attività decade abbastanza rapidamente e si riduce a metà in due ore e mezzo.

Quando si abbia l'intenzione di far l'analisi chimica del ferro irradiato per identificare la natura dei nuclei instabili che si sono formati, può essere conveniente di scioglierlo in acido nitrico prima di sottoporlo all'azione dei neutroni: l'idrogeno, l'ossigeno, l'azoto, che entrano nella composizione dell'acido nitrico, si sono infatti dimostrati inattivi anche se bombardati per 14 ore; dunque tutta l'attività della soluzione è certa-

mente dovuta al solo ferro. Come sappiamo, la ricerca chimica dell'elemento formatosi, si fa aggiungendo alla soluzione piccole quantità di elementi prossimi a quello in esame nel sistema di MENDELEJEW: nel caso dunque del ferro si sono aggiunte piccole dosi di sali di nichel, cromo manganese e cobalto; separati poi i diversi elementi fra di loro e dal ferro, e avvicinate successivamente le cinque frazioni a un contatore, si è riconosciuto che il manganese ha trascinato con sè la radioattività.

Dunque bombardando il ferro coi neutroni si forma un isotopo instabile del manganese, secondo la reazione probabile:

$$^{56}_{26}\mathrm{Fe} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{56}_{25}\mathrm{Mn} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} .$$

In questo caso il nucleo di ferro bombardato assorbe il neutrone ed emette un protone; non è però questo l'unico meccanismo possibile col quale un elemento stabile si trasforma in uno radioattivo. Si è trovato infatti che i tre schemi principali, secondo cui avviene la disintegrazione dei nuclei bombardati con neutroni sono i seguenti:

1°) assorbimento del neutrone ed emissione di un protone;

2°) assorbimento del neutrone ed emissione di una particella *alfa;*

3°) assorbimento del neutrone senza emissione di particelle.

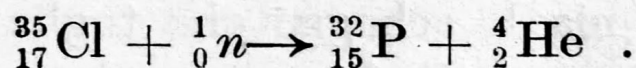
(*Curie* e *Joliot*)

a) Elettrone positivo e protone, provenienti dalla disintegrazione dell'azoto, irradiato con particelle alfa.

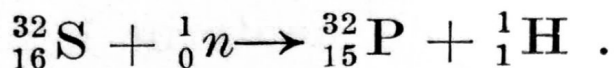
(*Curie* e *Joliot*)

b) Coppia di elettroni positivo e negativo, creati nel gas dal passaggio di raggi gamma.

Quando la disintegrazione nucleare segue il secondo schema, l'elemento bombardato coi neutroni, assorbendo un neutrone e emettendo una particella *alfa*, si trasforma in un altro elemento che ha carica nucleare di due unità inferiore a quello di partenza. Così, irradiando del cloruro d'ammonio, il cloro in esso contenuto si attiva (l'azoto e l'idrogeno non si attivano); portato in soluzione il cloruro d'ammonio e aggiunto in essa le solite piccole quantità di elementi prossimi al cloro nel sistema periodico, si è trovato che l'attività segue il fosforo: dal cloro che ha carica 17 si forma dunque del fosforo che ha carica 15 e probabilmente la reazione nucleare è:

$$^{35}_{17}\mathrm{Cl} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{32}_{15}\mathrm{P} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \ .$$

A questo isotopo radioattivo del fosforo si può arrivare non solo con l'azione dei neutroni sul cloro, ma anche prendendo come elemento di partenza lo zolfo. In entrambi i casi si forma un elemento radioattivo che emette raggi *beta* con lo stesso potere penetrante e che si riduce a metà nello stesso tempo; poichè il tempo di riduzione a metà è una caratteristica propria di ogni elemento, si può concludere anche senza analisi chimica, che lo stesso elemento, isotopo del fosforo, si è formato sia dal cloro che dallo zolfo. L'analisi chimica, che è stata fatta anche in questo caso, ha poi confermato le previsioni. La trasfor-

mazione dello zolfo in fosforo radioattivo avverrebbe dunque secondo la reazione:

$$^{32}_{16}S + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{32}_{15}P + ^{1}_{1}H \ .$$

Non è questo l'unico caso in cui, partendo da elementi diversi si ottiene lo stesso prodotto radioattivo: per esempio al manganese si può arrivare partendo dal ferro, come abbiamo visto, ma anche partendo dal cobalto e dal manganese stesso. Esistono dunque tre tipi di nuclei che possono espellere dei frammenti e ridursi in seguito a essere tutti e tre identici, ma i frammenti espulsi nei tre casi debbono essere evidentemente diversi: si può da tre diamanti greggi di diversa grossezza fare tre brillanti eguali per forma e dimensioni, ma le schegge che togliamo sono diverse nei tre casi. Così se si vuol trasformare un nucleo di ferro che ha carica 26, in uno di manganese, che ha carica 25, si « incolla » da prima un frammento (neutrone) sul nucleo primitivo, e poi se ne stacca un altro (protone). Se invece si arriva al manganese dal cobalto (carica 27), bisogna che dopo l'assorbimento del neutrone, si stacchi una particella *alfa*. Infine quando si parte dal manganese stesso, il nucleo primitivo non ha niente di troppo rispetto al nucleo di arrivo, anzi gli manca un pezzettino; a questo provvede assorbendo il neutrone, dopo di che non riemette nessuna particella. (Questo caso corrisponde dunque al 3º schema).

Se da due diamanti greggi diversi si possono fare due brillanti identici, è anche vero che da due pezzi di diamanti identici si possono ricavare, tagliandoli diversamente, due pietre diverse, per esempio un brillante e una rosetta. Così succede per alcuni nuclei: quelli di manganese stabile per esempio sono tutti identici, ma possono dar luogo a due tipi di nuclei diversi: il manganese stabile può trasformarsi in manganese instabile incollandosi un neutrone; esso può però anche trasformarsi in vanadio instabile, attaccandosi un neutrone, e espellendo subito una particella *alfa*. Quando infatti si irradia il manganese con neutroni, si trova che la sua attività è complessa e decade con due periodi diversi: vi è un periodo di 4 minuti circa (vanadio) e un periodo di due ore e mezzo (manganese). Riassumiamo nella figura 19 le trasformazioni che probabilmente avvengono per gli elementi dal 23 al 27. Nella figura sono stati riportati sull'asse delle ascisse i numeri atomici i quali, come sappiamo, corrispondono ai numeri di protoni contenuti nei vari nuclei. Sull'asse delle ordinate son stati riportati i numeri di neutroni contenuti in ciascun nucleo. Quindi:

un tratto verticale (lato di un sol quadretto) con la freccia rivolta verso l'alto, indica aumento (assorbimento) di un neutrone;

un tratto orizzontale (lato di un sol quadretto) con la freccia indicante da destra verso sinistra, indica emissione di un protone;

un tratto obliquo (diagonale di due quadretti) con freccia indicante da destra in alto verso sinistra in basso, indica emissione di una particella *alfa*;

un tratto obliquo (diagonale di un sol quadretto) da sinistra in alto verso destra in basso indica emissione di un elettrone; questo ultimo caso ci

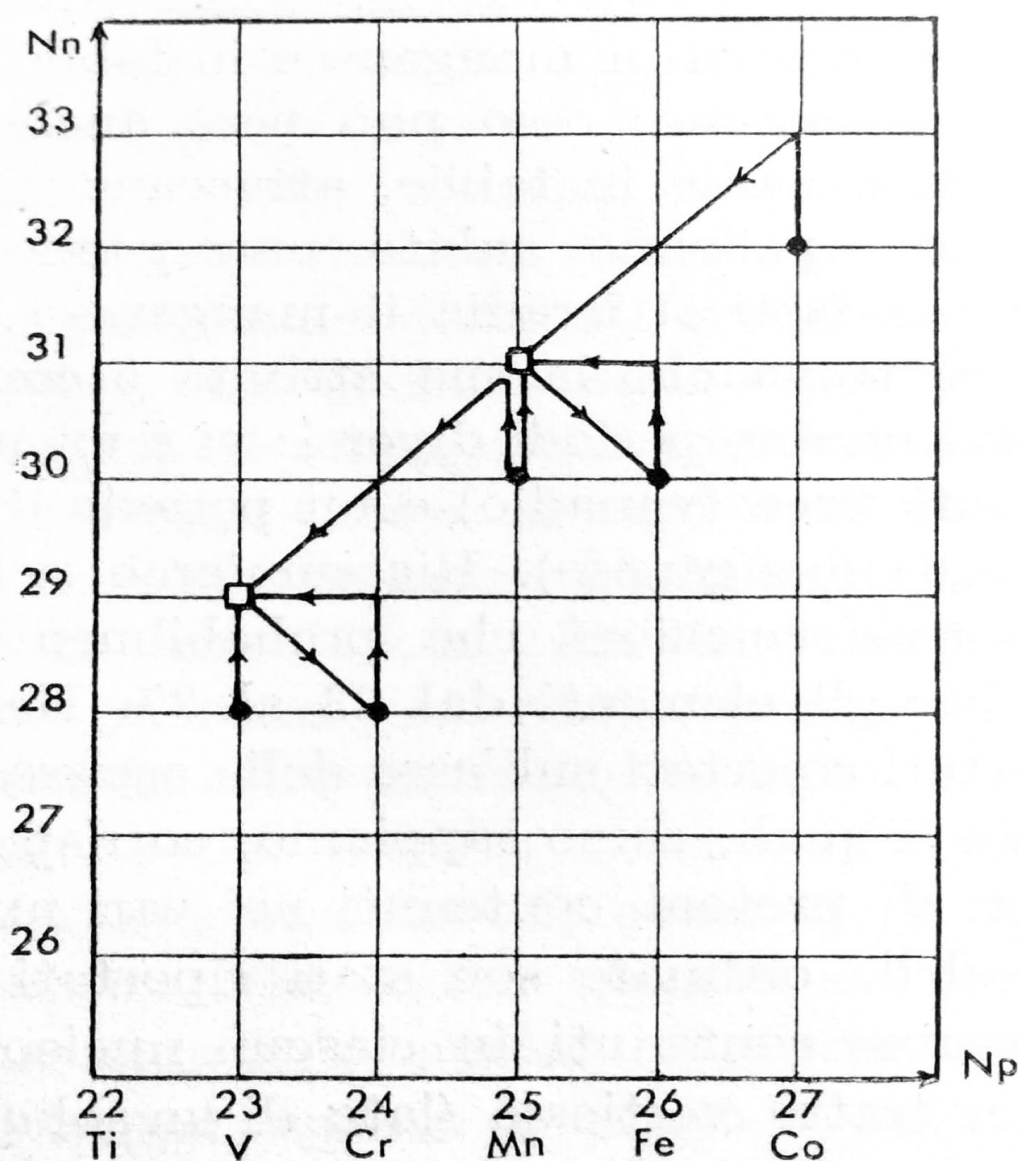



Fig. 19. — Probabili trasformazioni degli elementi dal 23 al 27, sotto l'azione del bombardamento con neutroni.

rappresenta la seconda fase della trasformazione nucleare: quando il nucleo, in seguito alla prima parte della trasformazione, è diventato radioattivo, esso emette prima o poi (seconda fase), una particella e si trasforma in un nucleo stabile.

Osserviamo che tutte le trasformazioni che partono da un nucleo stabile, cominciano con un tratto verticale verso l'alto, cioè tutti i nuclei assorbono in un primo tempo il neutrone che li ha colpiti. Tutte le trasformazioni che arrivano a un nucleo stabile partendo da uno radioattivo, sono rappresentate dalla diagonale di un quadretto, poichè consistono tutte nell'emissione di un elettrone. Partendo dal manganese stabile, tutti i nuclei assorbono un neutrone. Di questi una parte resta così fino all'emissione di una particella *beta* con la quale si trasforma in ferro stabile; un'altra parte invece, appena assorbito il neutrone emette una particella *alfa* e solo in seguito espelle un elettrone per diventare cromo.

Con questo esempio abbiamo voluto indicare qual'è il meccanismo che produce la radioattività artificiale dei nuclei bombardati con neutroni: ma non è nostra intenzione il descrivere dettagliatamente le singole esperienze, le analisi chimiche e le probabili trasformazioni nucleari dei singoli elementi.

***

Vogliamo ancora accennare però alla radioattività artificiale indotta in un particolare elemento: l'uranio. Il caso dell'uranio è un po' più complicato di tutti gli altri per varie ragioni: la prima complicazione deriva dal fatto che l'uranio è già di per sè radioattivo; è bensì vero che esso emette solo particelle *alfa*, le quali sono completamente assorbite nelle pareti del contatore e non possono entrare in esso; però l'uranio è sempre mescolato coi suoi prodotti di disintegrazione, alcuni dei quali emettono particelle *alfa*, altri particelle *beta* che verrebbero segnalate dal contatore. Bisogna dunque, prima di cominciare un'esperienza con l'uranio, separarlo dai suoi prodotti di decomposizione, dopo di che non vengono emesse spontaneamente particelle *beta*, almeno per un certo tempo.

Bombardando allora l'uranio coi neutroni, e avvicinandolo di nuovo al contatore, questo registra l'ingresso di particelle *beta* con intensità abbastanza grande, indicando così che alcuni nuclei di questo elemento si sono trasformati in un altro tipo di nuclei instabili, i quali non sono più capaci di emettere particelle *alfa*, ma emettono invece particelle *beta*. L'attività presentata dall'uranio, dopo il bombardamento presenta quattro diversi periodi di riduzione a metà, mostrando

che si sono formati quattro diversi tipi di nuclei radioattivi. Due periodi sono troppo brevi per poter sperare di far manipolazioni chimiche prima che l'elemento corrispondente si sia del tutto disattivato, poichè sono rispettivamente di 10 e 40 secondi. L'attenzione dei fisici di Roma si è fermata sugli altri due periodi, che sono l'uno di 13, l'altro di 100 minuti circa. Il FERMI e i suoi collaboratori hanno tentato di esaminare se l'elemento con periodo di 13 minuti fosse isotopo di uno degli elementi vicini all'uranio e compresi cioè fra quelli di numero atomico 86 e 92. Le esperienze hanno avuto esito negativo, e dobbiamo quindi pensare che in questo caso si sia formato un nuovo elemento, il quale avrebbe numero atomico più elevato dell'uranio, probabilmente 93. Lo stesso dovrebbe dirsi per l'elemento che ha periodo di 100 minuti. Non si può affermare con assoluta sicurezza l'esistenza dell'elemento 93 poichè le esperienze necessarie ad analizzarne la natura chimica, sono molto più delicate e complesse di quelle descritte precedentemente: molti infatti degli elementi che hanno numero atomico prossimo all'uranio, e che dovrebbero quindi servire a determinare se il nuovo elemento è un loro isotopo, sono radioattivi e tanto rari che si possono avere solo in quantità minime; non si può quindi sperare di usarli direttamente per trascinare i pochi atomi formatisi dall'uranio, e fare una separazione chimica, ma

bisogna ricorrere ad altri artifici complessi, in modo che i risultati delle esperienze sono in genere di difficile interpretazione. Molto recentemente i noti chimici tedeschi LISE MEITNER ed OTTO HANN hanno confermato e completato questi risultati sulla radioattività dell'uranio.

Per spiegare come si formerebbe l'elemento 93 bisogna ammettere che un nucleo di uranio bombardato assorba un neutrone trasformandosi in un nucleo isotopo di quello di partenza; la trasformazione sarebbe analoga a quella che abbiamo osservata per il manganese: esso assorbe un neutrone e si trasforma in un isotopo radioattivo del manganese stesso. Mentre però, questo, emettendo un elettrone diventa ferro stabile, l'isotopo radioattivo dell'uranio emetterebbe un elettrone e si trasformerebbe nell'elemento 93 che è a sua volta radioattivo.

L'assorbimento di un neutrone e la successiva emissione di un elettrone dà in tutti i casi (sia per il manganese che per l'uranio) come prodotto finale un elemento che nella tabella di MENDELEJEW segue immediatamente quello di partenza, poichè la sua carica è aumentata di un'unità. Per tutti gli elementi dunque del sistema periodico meno che per l'ultimo, l'elemento che si forma viene a essere isotopo di un elemento già conosciuto. Nel caso invece dell'uranio un aumento ulteriore di carica porta a un elemento che occupa una nuova casella nel sistema periodico e

che non si trova in natura. Il fatto che questo elemento abbia vita media assai breve ci rende conto d'altra parte del perchè non esiste in natura: qualora una volta sia stato presente sulla terra esso si deve essere disintegrato molto rapidamente, e attraverso a una catena di elementi successivi ha probabilmente dato luogo alla formazione di uno degli elementi comuni.

I nuclei radioattivi artificiali, creati in tutte le esperienze fatte fino a oggi possono emettere solo elettroni positivi o negativi, e nessun'altra particella si è potuta rivelare, almeno per ora. L'emissione di elettroni positivi o di elettroni negativi non dipende dall'elemento bombardato, ma dal proiettile che gli si lancia contro: le particelle cariche producono tutte nuclei radioattivi capaci di emettere positroni, i neutroni invece danno luogo a nuclei che espellono elettroni negativi.

Una spiegazione intuitiva di questo fatto si otterrà con un grafico; riprendiamo a questo scopo il diagramma che abbiamo già disegnato nel capitolo sul nucleo, riportando in ascisse il numero di protoni e in ordinate il numero di neutroni contenuti nel nucleo. Come abbiamo già visto i punti che rappresentano tutti i nuclei stabili esistenti in natura si trovano lungo una stri-

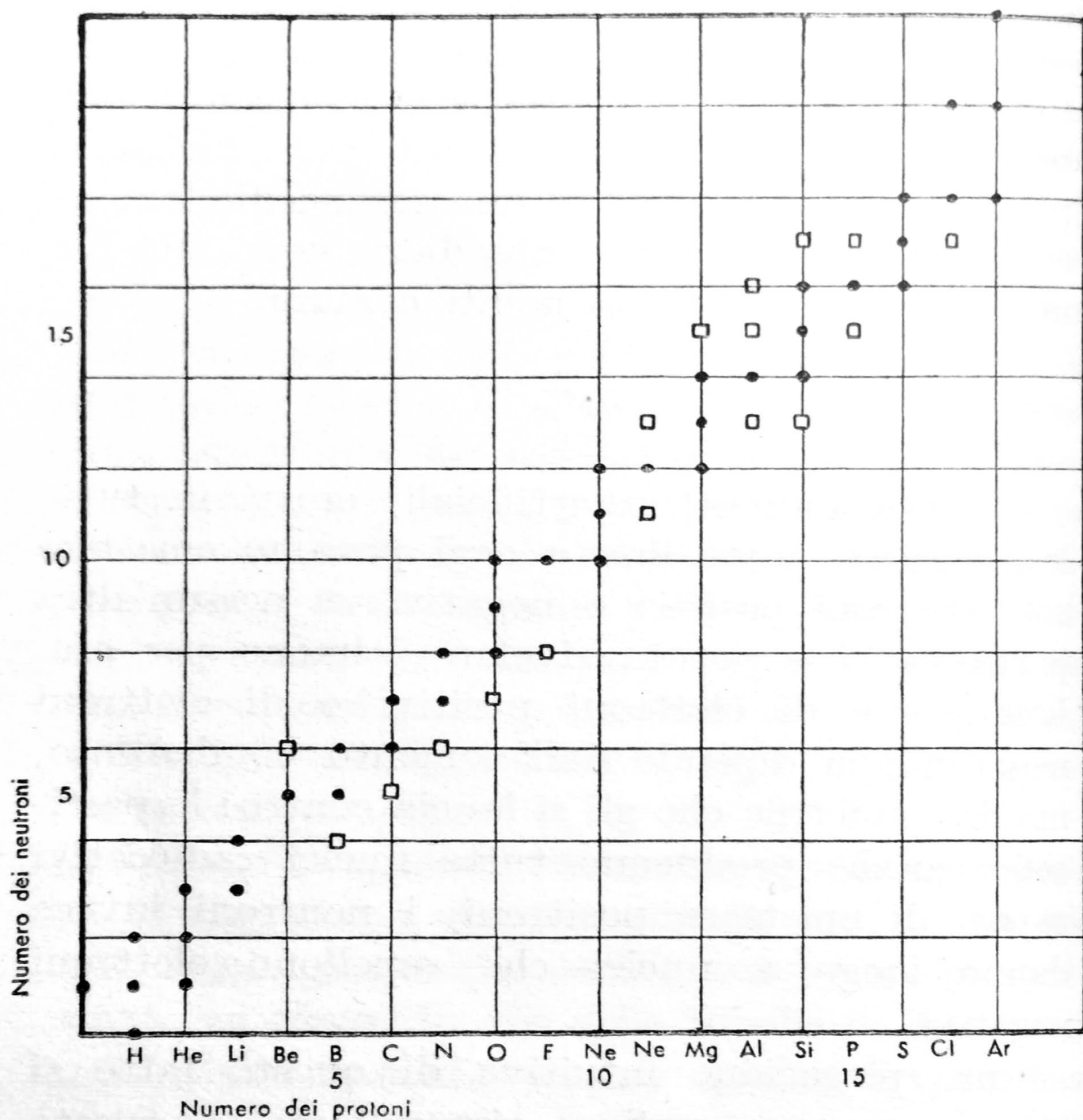



Fig. 20. — I nuclei stabili sono rappresentati dai cerchietti pieni, ed i nuclei radioattivi artificiali dai quadratini. Si noti che gli isotopi radioattivi ottenuti col bombardamento di neutroni si trovano al di sopra della zona dei nuclei stabili, mentre quelli ottenuti col bombardamento di particelle cariche si trovano al di sotto.

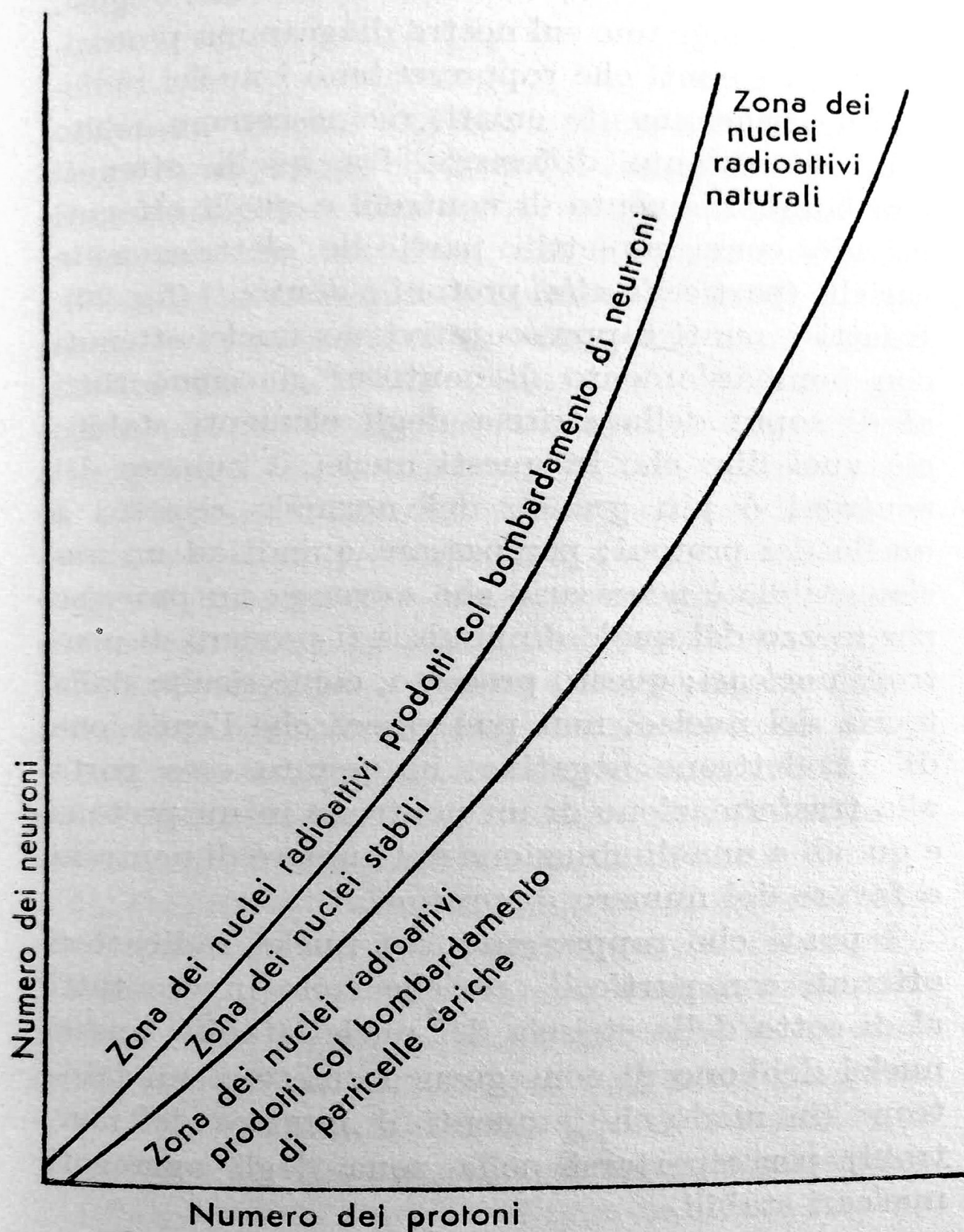



Fig. 21. — Schema della distribuzione dei vari tipi di nuclei nella tabella neutroni-protoni.

scia quasi rettilinea, che esce a 45° dall'origine. Se ora noi segnamo sul nostro diagramma protoni-neutroni i punti che rappresentano i nuclei radioattivi artificialmente creati, riconosceremo subito una interessante differenza fra quelli ottenuti con bombardamento di neutroni e quelli ottenuti usando come proiettili particelle elettricamente cariche (particelle *alfa*, protoni e deutoni) (fig. 20). Infatti i punti rappresentativi dei nuclei ottenuti con bombardamento di neutroni giacciono tutti al di sopra della striscia degli elementi stabili: ciò vuol dire che in questi nuclei il numero dei neutroni è più grande del normale rispetto a quello dei protoni; per passare quindi ad un nucleo stabile è necessario che avvenga un processo per mezzo del quale diminuisca il numero di neutroni nucleari; questo processo, come risulta dalla teoria del nucleo, non può essere che l'emissione di un elettrone negativo, in quanto esso porta alla trasformazione di un neutrone in un protone e quindi a una diminuzione del numero di neutroni a favore del numero di protoni.

I punti che rappresentano i nuclei radioattivi ottenuti con particelle cariche sono invece tutti al di sotto della striscia dei nuclei stabili; questi nuclei debbono di conseguenza emettere un positrone (in modo che aumenti il numero dei neutroni) per riportarsi nella zona degli aggregati nucleari stabili.

***

Durante le loro esperienze di bombardamento con neutroni, i fisici di Roma si accorsero che l'argento radioattivo non aveva sempre la stessa attività, ma che una volta, per esempio emetteva 100 elettroni al minuto e un'altra volta 80. E con successive osservazioni giunsero alla strana conclusione che l'attività variava al variare degli oggetti che circondavano la sorgente di neutroni e l'argento durante il tempo del bombardamento: in particolare l'attività dell'argento radioattivo diventava circa 30 volte più grande quando la sorgente di neutroni e l'argento bombardato erano circondati o da acqua o da paraffina. Poichè l'elemento comune a queste due sostanze è l'idrogeno, si giunge alla conclusione che la causa della variazione di attività deve ricercarsi nella presenza dell'idrogeno in vicinanza dell'elemento e della sorgente che emette i proiettili.

In seguito ad un gran numero di esperienze è stato possibile dare la spiegazione del fenomeno. I neutroni proiettili hanno la stessa massa dei protoni, cioè dei nuclei di idrogeno che si trovano nella sostanza che circonda la sorgente e l'argento durante il bombardamento. Questi neutroni, appena emessi, urtano contro i protoni, prima ancora di urtare contro i nuclei di argento. Supponiamo ora di fare urtare fra loro due palle del tutto

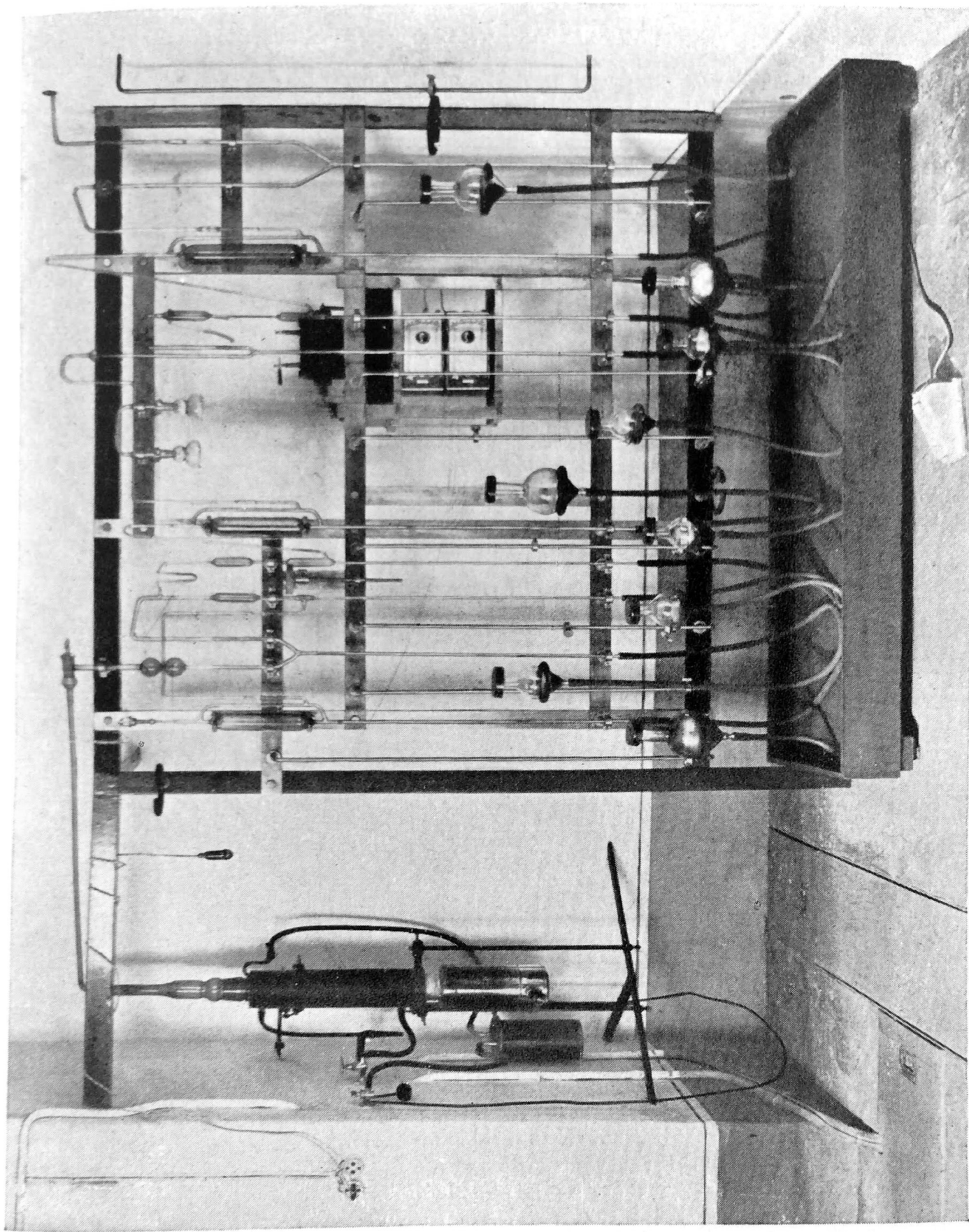
identiche, per esempio due palle di gomma; se una di queste è ferma e l'altra invece è animata da una certa velocità, dopo l'urto la palla che era ferma si sarà anche essa posta in movimento; e l'energia necessaria a questo moto è stata fornita dalla palla urtante, la quale perciò dopo l'urto avrà perduto una parte della sua velocità; se invece noi lanciamo una palla contro un corpo molto più pesante di essa, per esempio contro un automobile, questo non sarà affatto turbato dall'urto e la palla rimbalzerà, animata dalla stessa velocità che aveva prima dell'urto.

Torniamo ora al nostro caso di urto fra un neutrone ed un protone; poichè questo secondo si può considerare immobile, e poichè le due particelle hanno massa identica, dopo l'urto il protone si sarà messo in moto a spese dell'energia del neutrone urtante. Dopo questo primo urto il neutrone continuerà il suo cammino in una direzione e con una velocità diversa dalle primitive fino a quando in seguito ad un secondo urto, cambierà nuovamente velocità e direzione di movimento. Facendo un calcolo non molto complicato si può giungere alla conclusione che un neutrone che si muove entro un blocco di paraffina o dentro l'acqua, subisce un tal numero di urti contro i protoni che la sua velocità alla fine si riduce assai piccola. I neutroni rallentati con questo processo furono chiamati dai fisici di Roma «neutroni lenti»; essi mostrano

delle proprietà assai diverse dai neutroni emessi dalle ordinarie sorgenti.

La proprietà in grazia alla quale furono scoperti i neutroni lenti è, come abbiamo visto, la loro particolare efficacia nel produrre elementi radioattivi; nel caso dell'argento, immergendo la sorgente e il metallo da irradiare in un recipiente pieno d'acqua, l'attività cresce di un fattore 30. In altri casi l'aumento di attività che si ottiene immergendo il tutto in una sostanza idrogenata, è assai minore. Per misurare la efficacia dei neutroni lenti sulle diverse sostanze è stato definito un « coefficiente di sensibilità » nel modo seguente: si irradia un determinato pezzo della sostanza in esame con una determinata sorgente e ad una certa distanza, una volta nell'acqua ed una volta nell'aria; il rapporto dei numeri di impulsi misurati col contatore nei due casi è il coefficiente di sensibilità. Tale coefficiente, che per l'argento è 30, è uguale a 40 per il vanadio ed uguale ad 1 per il silicio: ciò significa che nel caso del silicio i neutroni lenti non sono più efficaci dei neutroni veloci. Uno studio sistematico dei coefficienti di sensibilità di tutti gli elementi ha permesso di riconoscere che ogni qualvolta il nucleo radioattivo in esame si forma da un nucleo stabile con assorbimento di un neutrone e contemporanea emissione di un protone o di una particella *alfa*, il coefficiente di sensibilità è uguale a 1: ossia questo processo non è in alcun modo favorito dalla

lentezza dei neutroni. Il coefficiente di sensibilità è sempre invece maggiore di uno nei processi in cui si forma un nucleo radioattivo da un nucleo stabile con semplice cattura di un neutrone. Il comportamento dei neutroni lenti nel caso della semplice cattura si può facilmente rendere intuitivo col seguente paragone: supponiamo di avere in un terreno piano una buca e di voler far cadere in essa una piccola palla facendola rotolare per terra. Se la palla viene lanciata molto velocemente nella giusta direzione, essa, dopo esser caduta nella buca, ne balzerà subito fuori: mentre riusciremo certamente nel nostro intento se faremo ruzzolare pian piano la palla fin sull'orlo della buca. Questa analogia ci permette di capire come, nel processo di semplice cattura da parte dei nuclei, i neutroni lenti siano più efficaci di quelli veloci; nel caso invece in cui la formazione del radioelemento avviene attraverso ad un processo in cui si ha l'emissione di una particella pesante (protone o particella *alfa*) è necessario che il neutrone urtante sia dotato di un'energia sufficiente per poter staccare un frammento del nucleo urtato.

Un altro metodo molto interessante e semplice per studiare il comportamento dei neutroni lenti consiste nell'osservare come essi vengono assorbiti da strati dei vari elementi. L'esperienza si può immaginare eseguita nel modo seguente: la sorgente di neutroni (solito tubetto contenente

Apparecchio per l'estrazione e la purificazione della emanazione di radio.

(*Laboratorio Fisico della Sanità Pubblica*)

emanazione e berillio) viene infilata in un foro praticato in un grosso cilindro di paraffina, come mostra la figura schematica 22: al di sopra di questo viene posta una laminetta di rodio, indicata con Rh, la quale viene a sua volta coperta con un secondo cilindro di paraffina. In questa

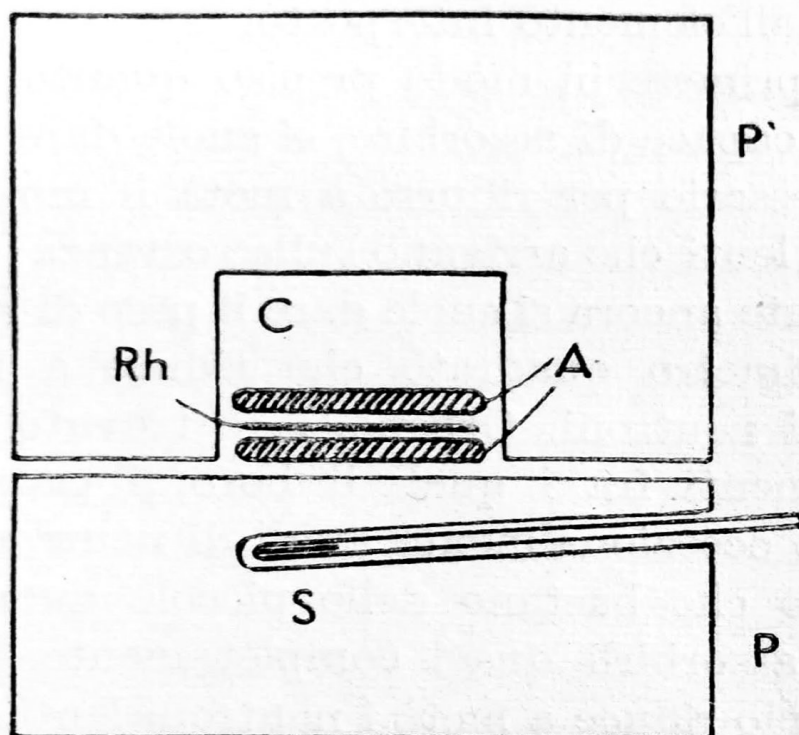



Fig. 22.

esperienza il rodio ci serve come rivelatore dei neutroni lenti, poichè in queste condizioni esso si attiva in modo particolarmente intenso. La laminetta di rodio si può porre fra due strati dell'elemento che si vuole esaminare dal punto di vista della sua capacità nell'assorbire i neutroni lenti. Si misura allora l'attività della laminetta di rodio quando essa non è schermata da alcun

elemento: quindi si attiva di nuovo la stessa laminetta tenendola tra due strati di un determinato spessore dell'elemento che si vuole studiare. Misurando l'attività che acquista il rodio in queste seconde condizioni si trova che la sua attività è minore che nel caso precedente; si determina così quale frazione dei neutroni lenti è stata assorbita dall'elemento interposto.

Per esprimere in modo preciso quanto una sostanza è capace di assorbire, si suole dare lo spessore necessario per ridurre a metà il numero dei neutroni lenti che arrivano sulla sostanza; più comunemente ancora si suole dare il peso di sostanza per centimetro quadrato che riduce a metà il flusso dei neutroni. Orbene, si è trovato che alcuni elementi fra i quali il boro, il cadmio e il litio sono eccezionalmente avidi di neutroni lenti, per modo che bastano delle piccole quantità di essi per assorbirli quasi completamente. Il boro per esempio riduce a metà i neutroni lenti qualora abbia uno spessore così piccolo da contenere solo 4 milligrammi di materia per centimetro quadrato. La cosa sorprende ancor più quando si pensi che per ridurre a metà il numero dei neutroni lenti col piombo, è necessario uno spessore di circa 15 centimetri, che corrisponde a circa 200 grammi per centimetro quadrato. Tale comportamento dei neutroni lenti è totalmente diverso da quello dei neutroni veloci, perchè questi ultimi vengono ridotti a metà in uno spessore di

piombo di circa 5 centimetri, mentre non vengono assorbiti affatto da 4 milligrammi di boro.

Le esperienze coi neutroni lenti sono state fatte a Roma in questi ultimi mesi (1935) e con la loro descrizione abbiamo finito il nostro cenno sullo stato attuale della fisica. Ci sarebbe molto gradito di poter chiudere questa breve esposizione con un elenco di applicazioni pratiche della radioattività artificiale, poichè « val più la pratica che la grammatica » e suscita maggior interesse nel pubblico. Disgraziatamente invece non solo queste applicazioni non esistono per ora, ma nemmeno si può sapere se esisteranno per l'avvenire.

Tuttavia va considerato con ottimismo il fatto che recentemente il fisico LAWRENCE, bombardando il sodio con deutoni accelerati, è riuscito a produrre circa un millicurie di radiosodio. Un « curie » di sostanza radioattiva è la quantità di quella sostanza che presenta la stessa attività di un grammo di radio; un millicurie, che è la millesima parte del curie, pur essendo una quantità assai piccola, trascurabile a paragone delle quantità degli elementi comuni, è però confrontabile con quelle degli elementi radioattivi naturali che si possono avere normalmente a disposizione.

Il radiosodio ha suscitato vivo interesse per le sue eventuali applicazioni nel campo della medicina: il fisico COCKCROFT, in una sua conferenza tenuta a Manchester, ha illustrato il sodio radioattivo da questo punto di vista; egli ha fatto notare che questo elemento emette raggi *gamma* con energia doppia di quelli emessi dal radio; e il fatto che le proprietà terapeutiche del radio sono dovute ai raggi *gamma*, suggerisce l'idea di usare anche il radiosodio per la cura del cancro. Esso presenterebbe un vantaggio sul radio: infatti la vita media di quest'ultimo è lunghissima e quindi il radio non può essere lasciato dentro al corpo umano, poichè, dopo aver distrutto i tessuti del tumore, esso distruggerebbe a poco a poco anche i tessuti circostanti; invece l'attività del radiosodio si riduce a metà in circa 12 ore, e si annulla completamente prima di poter danneggiare in alcun modo l'organismo umano; perciò il sodio radioattivo si potrebbe somministrare senza timore di conseguenze pericolose.

Secondo l'opinione di COCKCROFT non bisogna tuttavia farsi troppe illusioni sulla possibilità di adottare il radiosodio come sostituto del radio: prima di tutto questo elemento radioattivo artificiale dovrà essere sperimentato per un lungo periodo prima che si possa asserire il suo valore terapeutico; infatti i raggi *gamma* che esso emette differiscono da quelli del radio per la loro maggiore energia e possono in conseguenza non avere

gli stessi effetti. In secondo luogo il COCKCROFT ritiene che se anche si riconosceranno proprietà curative nel radiosodio, e se lo si potrà produrre in quantità sufficienti, il suo costo di produzione sarà più elevato del prezzo del radio stesso, a meno che non si trovi in avvenire un procedimento più economico per suscitare la radioattività nel sodio.

INDICE DEI NOMI

INDICE ANALITICO

N

O

P

Q

R

S

T

V